



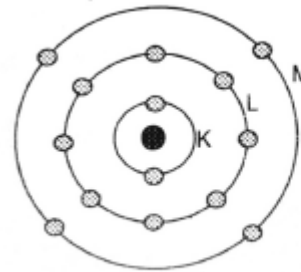
Osnovi fizike poluprovodnika

Energetski nivoi elektrona

Pozitivno naelektrisano jezgro

Negativno naelektrisani elektroni kruže po orbitama.

Elektroni u orbitama imaju tačno određene nivoe energije.



Za prelazak u drugu orbitu elektronu je potrebno saopštiti energiju koja je jednaka razlici energija po orbitama.

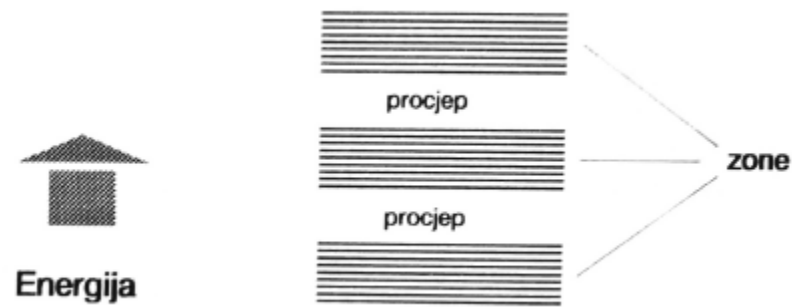
Od jezgra ka poslednjoj orbiti elektroni su sve slabije vezani sa jezgrom.

Elektronima u poslednjoj orbiti potrebno je saopštiti najmanje energije za napuštanje atoma. Ti elektroni se nazivaju valentni elektroni.

Više atoma jedan do drugoga

Elektroni koji su u pojedinim atomima imali iste energijske nivoe, ne mogu ih takvim zadržati (zbog efekata koje objašnjava kvantna mehanika).

Svaki energetski nivo cijepa se na više, veoma bliskih, podnivoa, čime se formiraju tzv. Energetske zone.



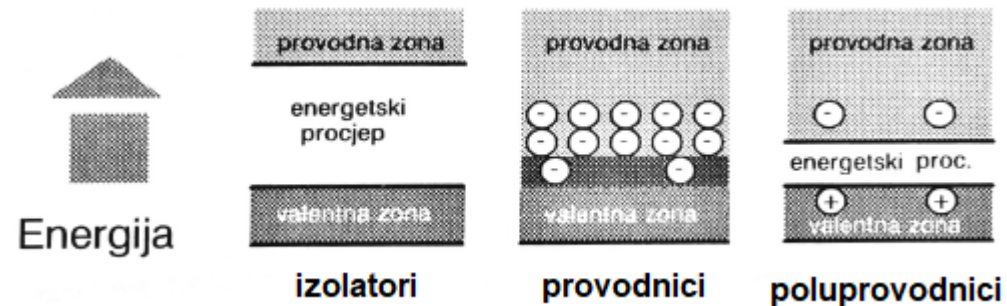
Unutar zone elektroni imaju tačno definisane diskretne vrijednosti energije.

Ukupna energetska razlika jedne zone, manja je od termičke energije elektrona na sobnoj temperaturi. Stoga se elektron lako kreće unutar zone.

Razlika energija pojedinih energetskih zona naziva se energetski procjep.

Energetski procjep

Veličinom energetskeg procjepa definisani su različiti materijali.



Izolatori – veliki procjep – potrebno saopštiti veliku energiju da bi electron prešao iz valentne u provodnu zonu.

Provodnici – valentna i provodna zona se preklapaju – postoji veliki broj slobodnih nosilaca naelektrisanja.

Polurovodnici – energetski procjep negdje između izolatora i provodnika ($<3\text{eV}$).

Sopstvena provodnost poluprovodnika

Kod čistih poluprovodnika, pri temperaturi apsolutne nule, elektroni u valentnoj zoni nemaju dovoljno energije da pređu u provodnu zonu.

Dovođenjem energije spolja (toplota, svjetlost, ...) neki valentni elektroni postaju sposobni da pređu u provodnu zonu.

Prelaskom u provodnu zonu za sobom ostavljaju šupljinu (elementarno pozitivno naelektisanje).

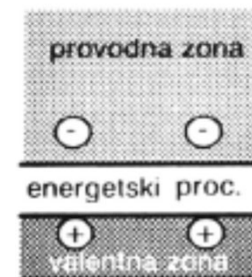
Generacija - nastajanje para electron šupljina

Rekombinacija – popunjavanje šupljina elektronima.

Smjerovi kretanja elektrona i šupljina su suprotni

Broj generisanih elektrona (n_i) i šupljina (p_i) u čistom poluprovodniku uvijek je jednak.

Elektična provodnost čistih poluprovodnika jako je mala.



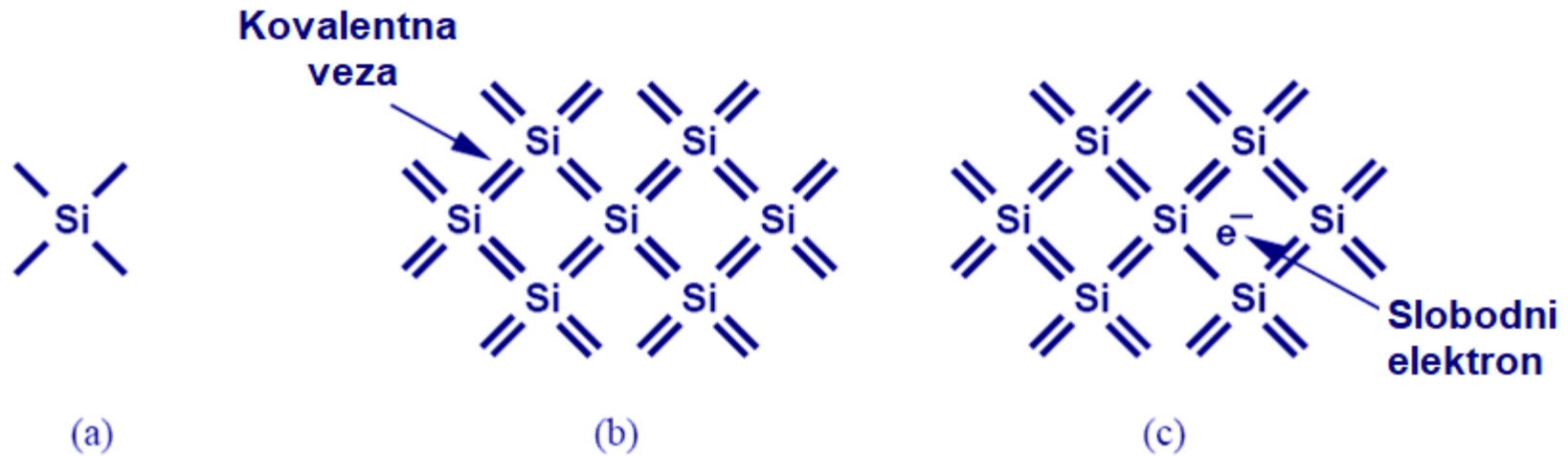
poluprovodnici

Periodna Tabela

	III	IV	V	
	Boron (B)	Carbon (C)		
• • •	Aluminum (Al)	Silicon (Si)	Phosphorous (P)	• • •
	Galium (Al)	Germanium (Ge)	Arsenic (As)	
		• • •		

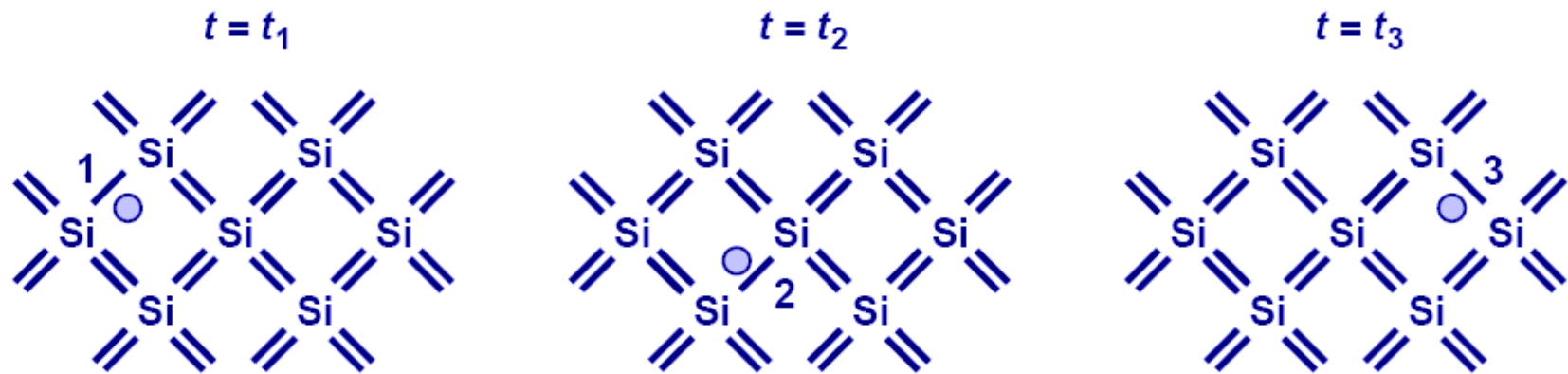
- Ovaj dio periodne tabele sadrži elemente sa tri do pet valentnih elektrona (Si je najvažniji).

Silicijum



- Si ima četiri valentna elektrona. Stoga može formirati kovalentne veze sa četiri svoje komšije.
- Sa porastom temperature, elektroni se oslobađaju iz kovalentnih veza.

Elektron-Šupljina par - Interakcija



- Slobodni elektroni razbiju kovalentnu vezu, generišu se šupljine.
- Šupljine se mogu ispuniti apsorpcijom drugih slobodnih elektrona,
- Postoji protok nosača naelektrisanja.

Gustina slobodnih elektrona na datoj temperaturi

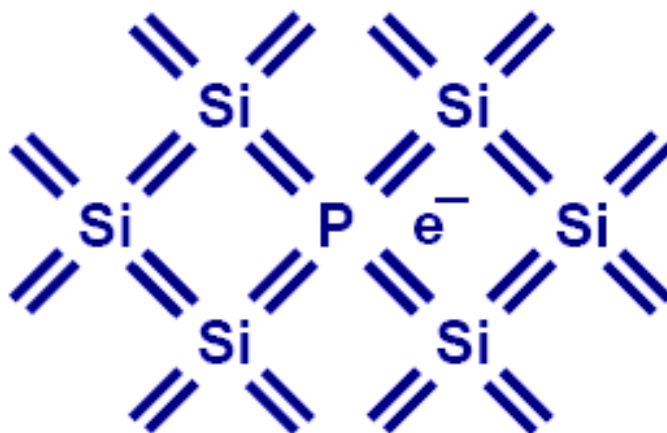
$$n_i = 5.2 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT} \text{ electrons / cm}^3$$

$$n_i(T = 300^0 K) = 1.08 \times 10^{10} \text{ electrons / cm}^3$$

$$n_i(T = 600^0 K) = 1.54 \times 10^{15} \text{ electrons / cm}^3$$

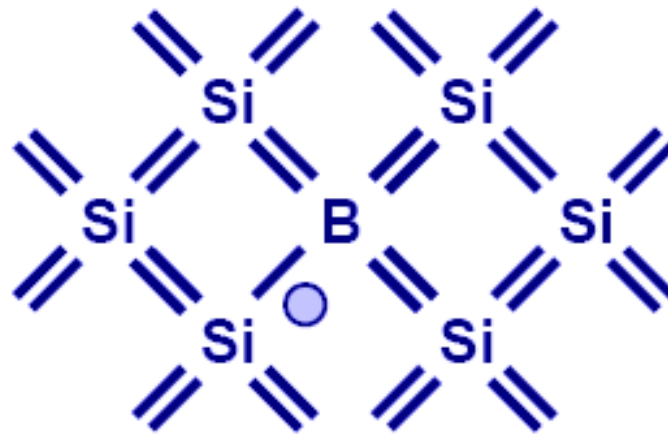
- E_g (bandgap energy) ili energetski procjep određuje koliko je energije potrebno saopštiti da bi electron napustio kovalentnu vezu i prešao u provodnu zonu.
- Postoji eksponencijalna zavisnost između gustine slobodnih elektrona i energetskog procjepa.

Dopiranje (N tip)



- Čisti Si se može dopirati sa drugim elementima i tako mu mijenjati električne karakteristike.
- Na primjer, ako je Si dopiran sa P (fosfor), dobija više elektrona i postaje N tip poluprovodnika.

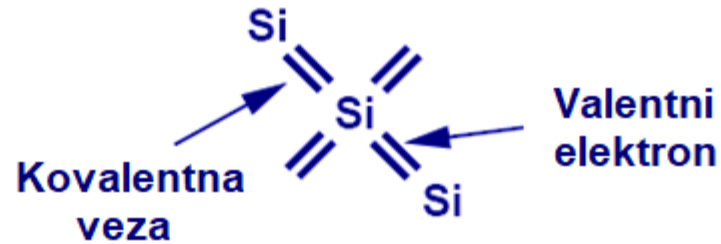
Dopiranje (P tip)



- Ako je Si dopiran sa B (bor), dobija više šupljina i postaje tip P poluprovodnika.

Nosioci naelektrisanja

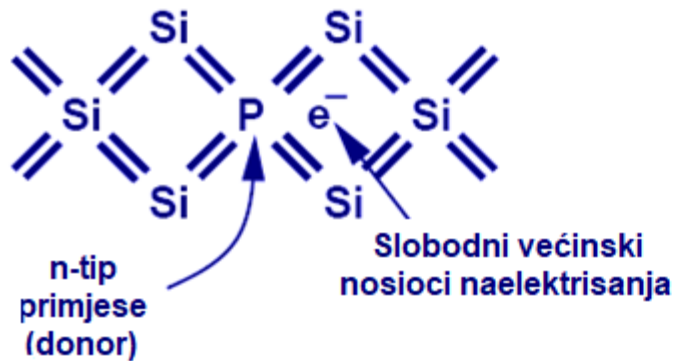
Nedopirani poluprovodnik



Dopirani poluprovodnik

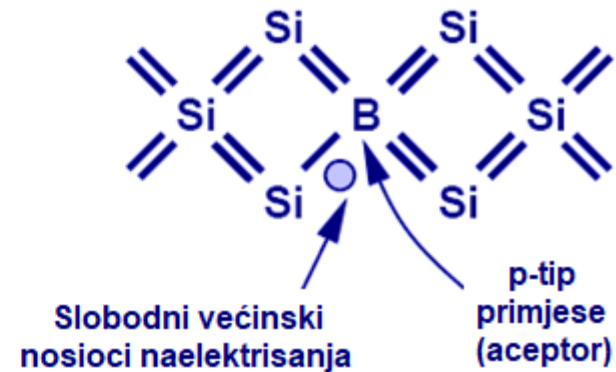
Silicijumski kristal

$$N_D = \text{Donora/cm}^3$$

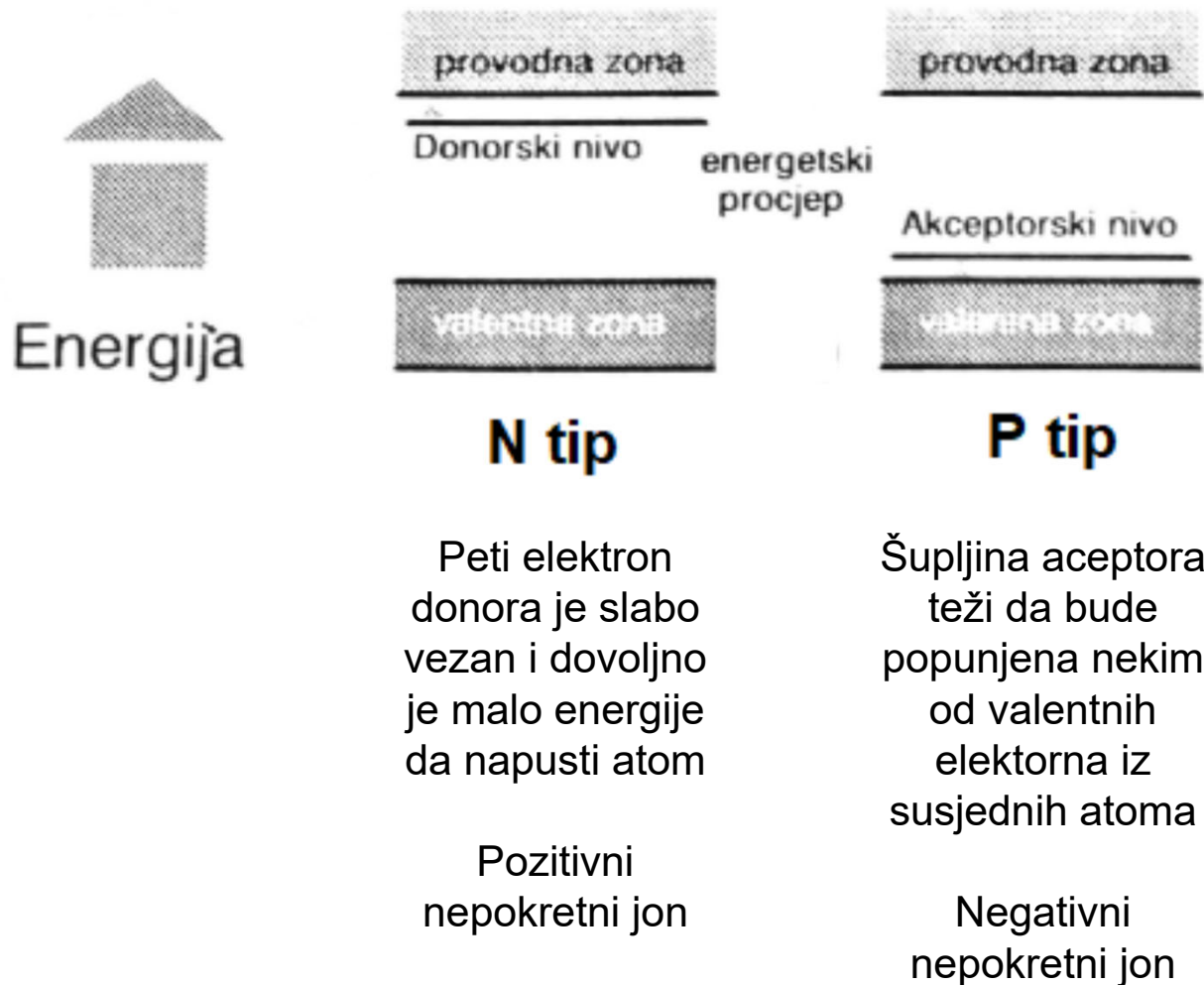


Silicijumski kristal

$$N_A = \text{Aceptora/cm}^3$$



Primjesna provodnost poluprovodnika



Gustine elektrona i šupljina

$$np = n_i^2$$

Većinski nosioci: $p \approx N_A$

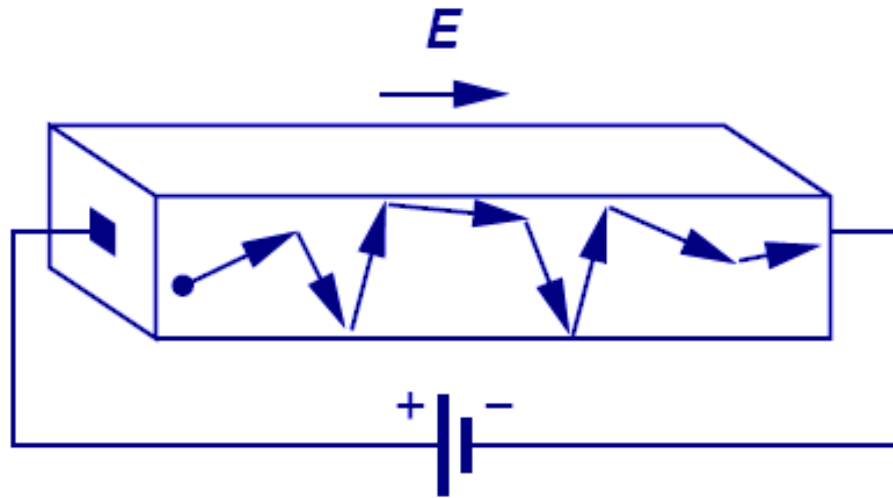
Manjinski nosioci: $n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$

Većinski nosioci: $n \approx N_D$

Manjinski nosioci: $p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$

- **Proizvod gustine elektrona i šupljina je UVIJEK jednak kvadratu gustine elektrona nedopiranog poluprovodnika, bez obzira na nivo dopinga.**

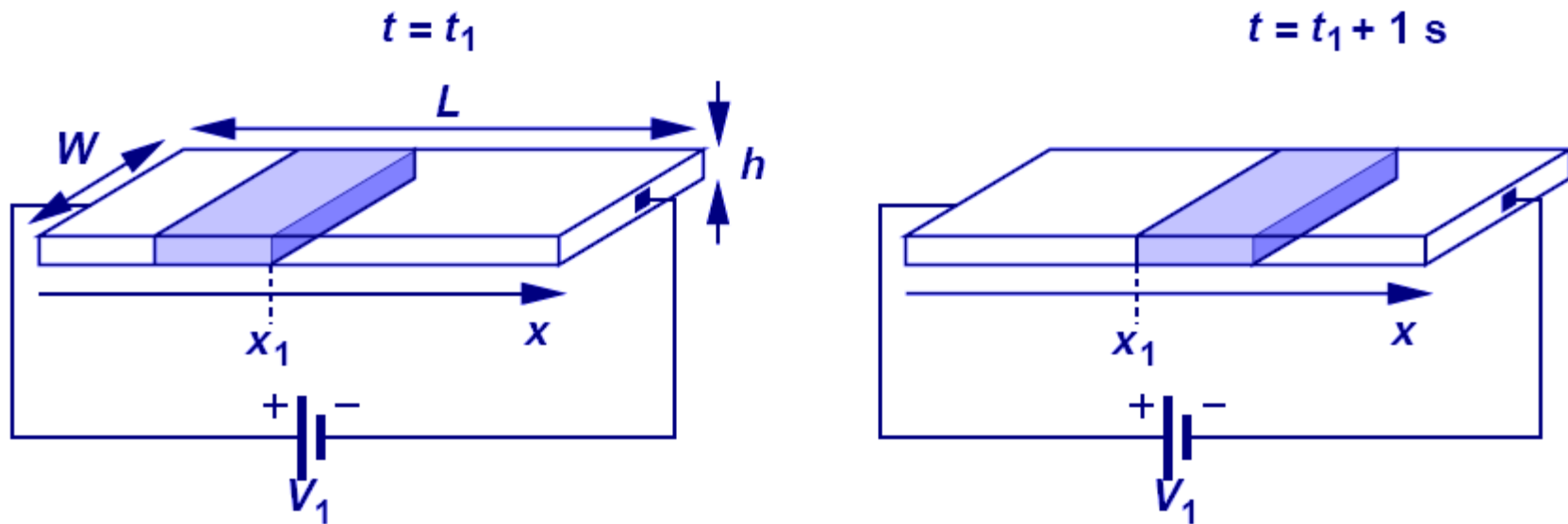
Prvi mehanizam protoka naelektrisanja: kondukcioni protok naelektrisanja (drift)



$$\vec{v}_h = \mu_p \vec{E}$$
$$\vec{v}_e = -\mu_n \vec{E}$$

- Proces u kojem se čestice naelektrisanja kreću usljed prisustva električnog polja naziva se kondukcioni protok naelektrisanja.
- Čestice naelektrisanja kretaće se brzinom proporcionalnom električnom polju.

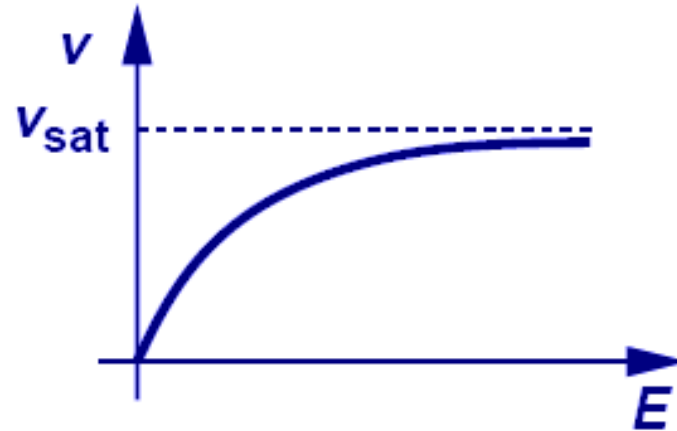
Proticanje struje: Opšti slučaj



$$I = -v \cdot W \cdot h \cdot n \cdot q$$

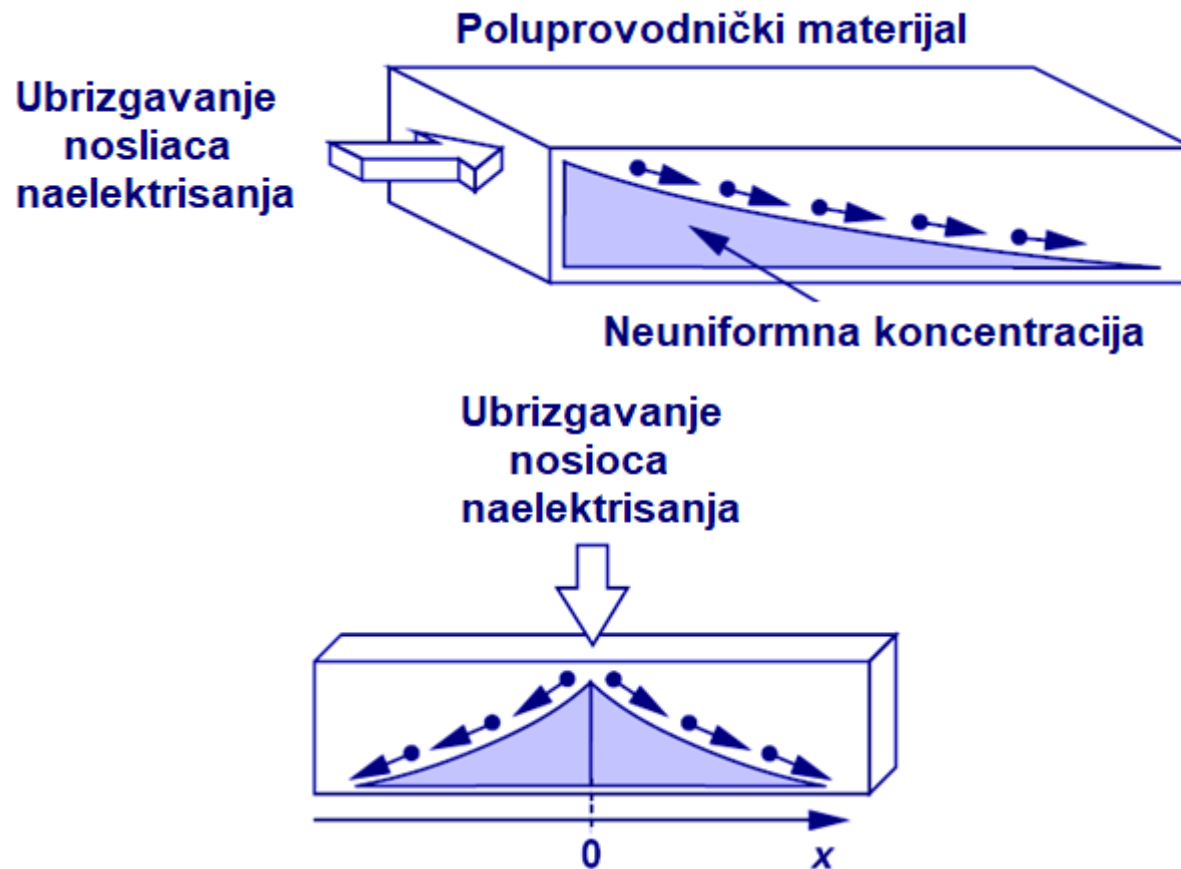
- Električna struja se izračunava kao količina naelektrisanja koja prolazi kroz poprečni presek provodnika, u jedinici vremena.

Zasićenje brzine

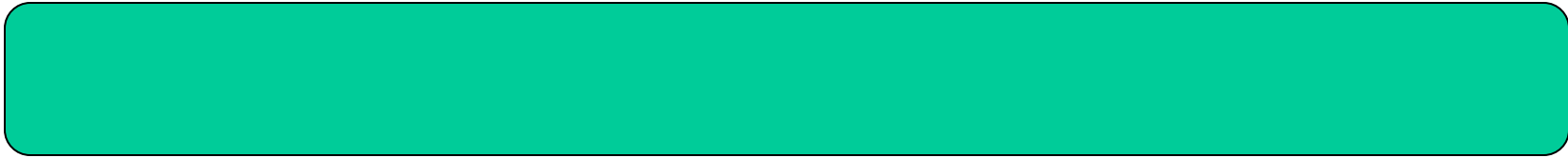


- U stvarnosti brzina se ne povećava linearno sa električnim poljem, već dostiže zasićenje.

Drugi mehanizam protoka naelektrisanja: Difuzija

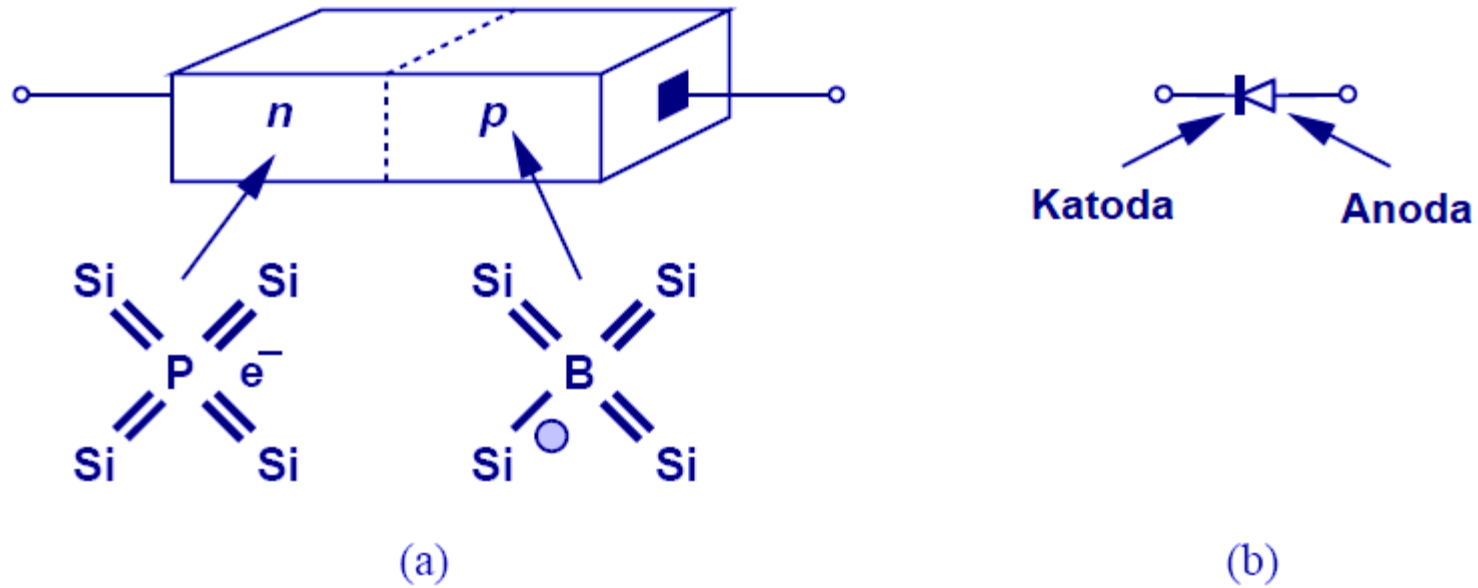


- Čestice naelektrisanja prelaze iz regiona visoke koncentracije u područje niske koncentracije.
- Analogno primjeru kapljice mastila u vodi.
- Posljedica raličitih koncentracija slobodnih nosioca.



PN spoj (Dioda)

PN Junction (Diode)

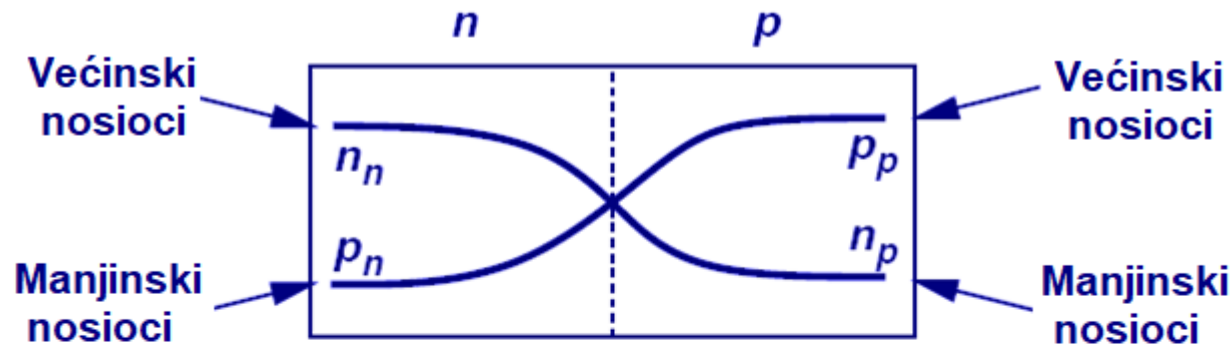


- Kada se izvrši spajanje poluprovodnika N-tipa i P-tipa formira se PN spoj odnosno dioda.
- Spajanje poluprovodnika je složen tehnološki process, nije prosto spajanje

Različiti slučajeви polarizacije diode

- **Da bismo razumeli kako diode funkcioniše, potrebno je proučiti njeno ponašanje u tri različita slučaja:**
 - nepolarizovana dioda,
 - inverzno polarizovana i
 - direktno polarizovana.

Struja kroz spoj: Difuzija



n_n : Koncentracija elektrona
na n stani

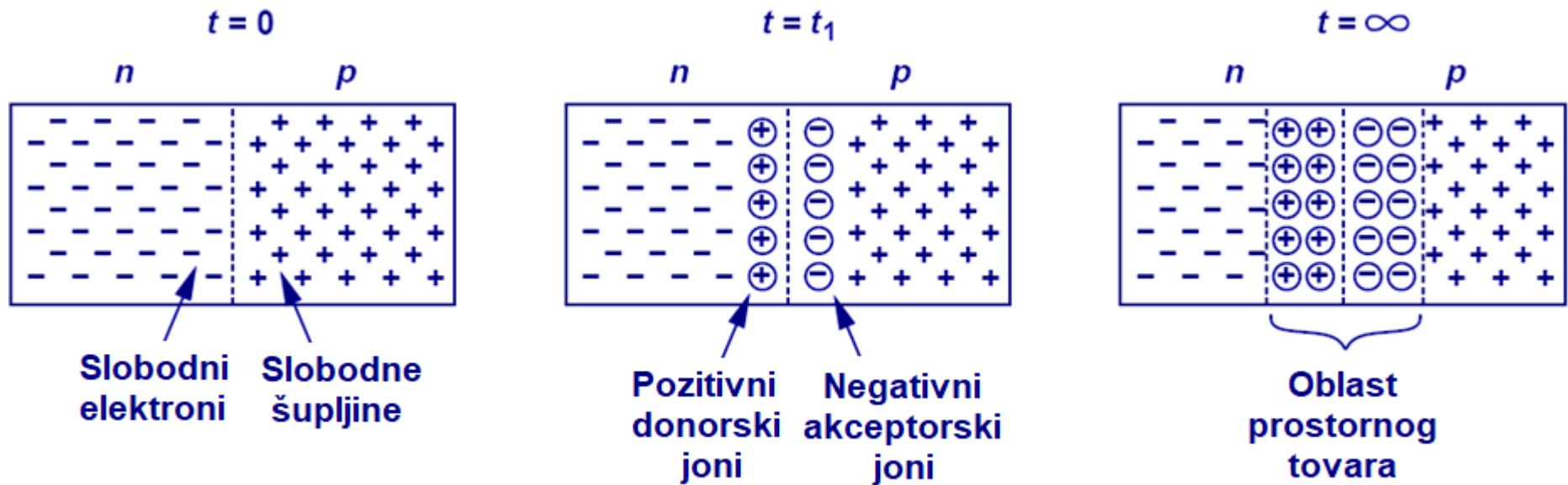
p_n : Koncentracija šupljina
na n strani

p_p : Koncentracija šupljina
na p strani

n_p : Koncentracija elektrona
na p strani

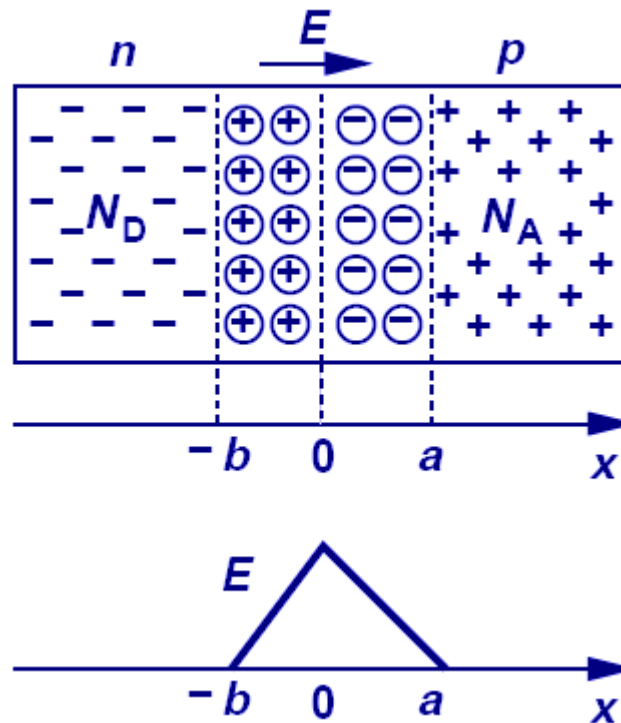
- Kako P i N tip poluprovodnika sadrže višak šupljina i elektrona, postoji veliki gradijent koncentracije. Stoga teče difuzijska struja kroz spoj sa svake strane.

Nepolarizovana dioda - oblast prostornog tovara



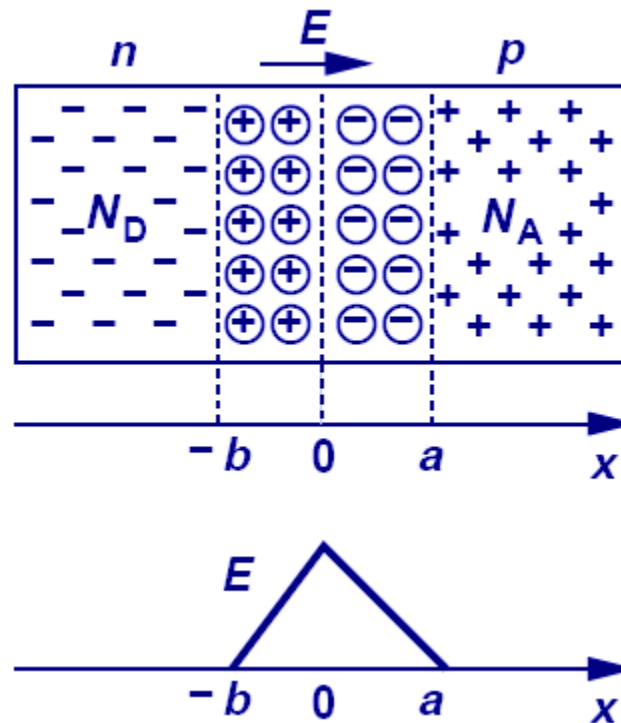
- Slobodni elektroni i šupljine prolaze kroz spoj i iza njih ostaje područje fiksnih jona. Ovaj region je poznat kao "oblast prostornog tovara".

Nepolarizovana dioda - električno polje



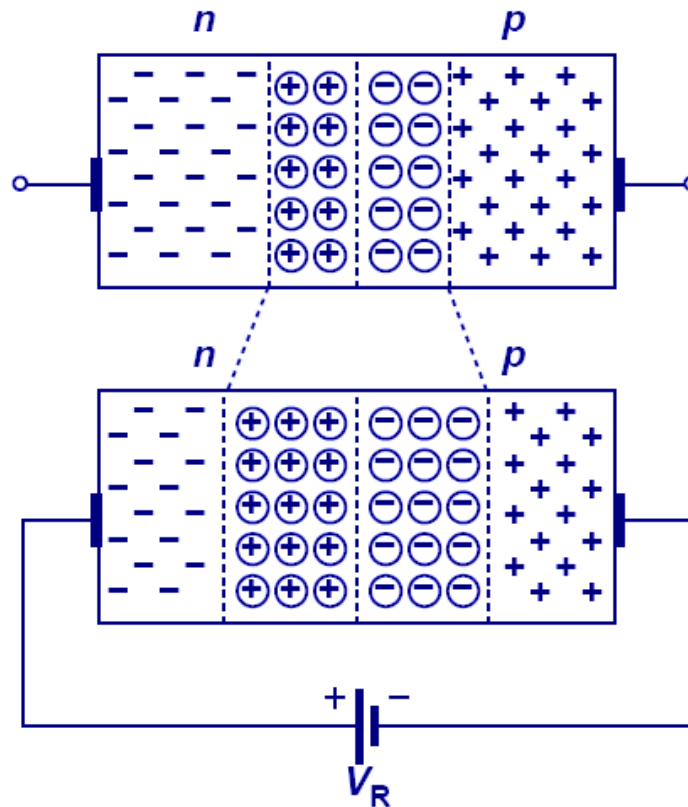
- Fiksni joni u području prostornog tovara stvaraju električno polje koje ima smjer od pozitivnog ka negativnom naelektrisanju.
- Smjer polja je takav da se protivi daljem kretanju elektrona, odnosno šupljina.
- Kada postane dovoljno jako prestaje difuziono kretanje naelektrisanja.

Nepolarizovana dioda - potencijalna barijera



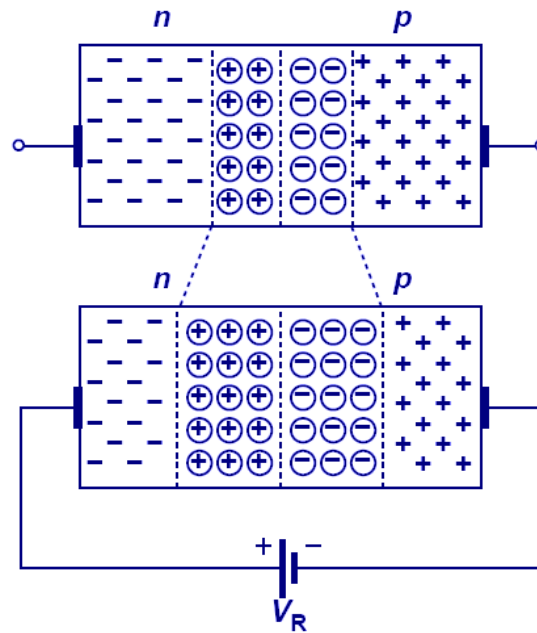
- Razlika potencijala između krajnjih tačaka oblasti prostornog tovara naziva se potencijalna barijera.
- Većinski nosioci sa jedne i druge strane spoja, nijesu u stanju da pređu potencijalnu barijeru (u odustvu stranog polja)
- Uspostavljeno polje je najjače na samoj granici spoja, jer se samo u tim tačkama polja od svih dipola sabiraju.

Inverzna polarizacija diode

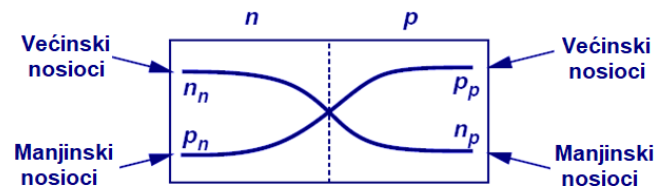


- Kada je dio diode N tipa povezan sa većim potencijalom od regiona tipa P, dioda je inverzno polarizovana.
- To rezultira širim područjem prostornog tovara i većim ugrađenim električnim poljem na spoju spoja.

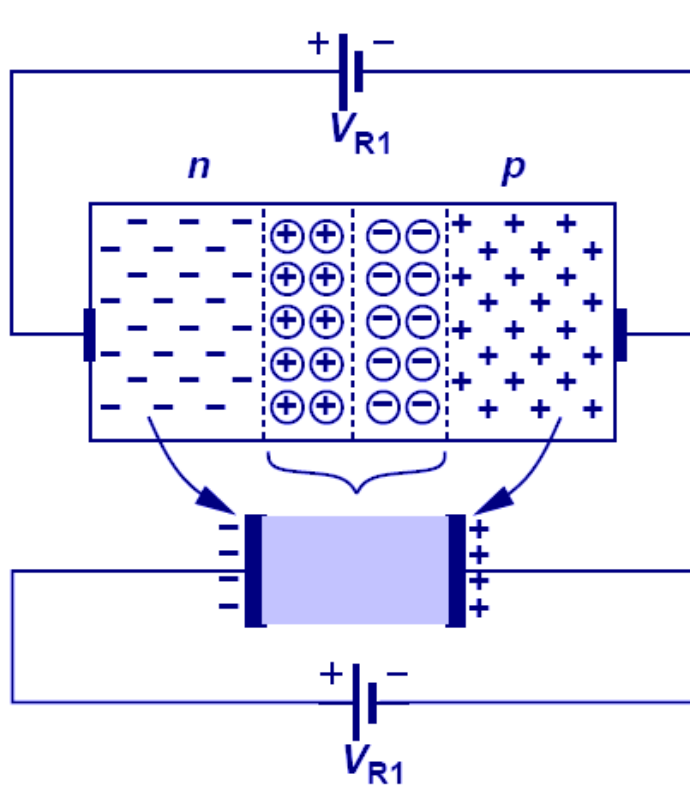
Inverzna polarizacija diode



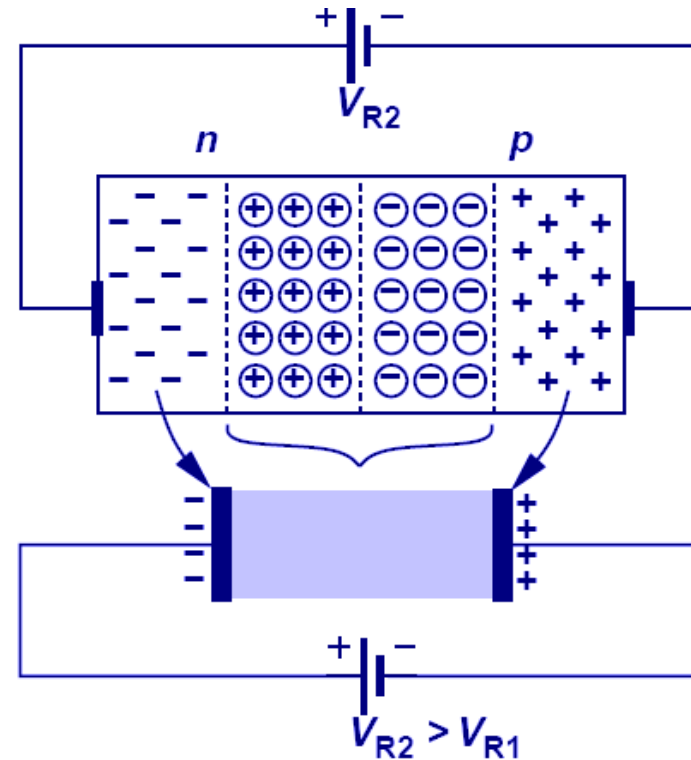
- Inverzna polarizacija pogoduje slobodnim manjinskim nosiocima naelektrisanja (elektronima u P-tipu i šupljinama u N-tipu).
- Iako su u malom broju oni ipak uspostavljaju neku veoma malu struju – inverzna struja zasićenja
- U praktičnim aplikacijama ova struja se uglavnom zanemaruje.



Primjena inverno polarisane diode: Naponom kontrolisani kondenzator



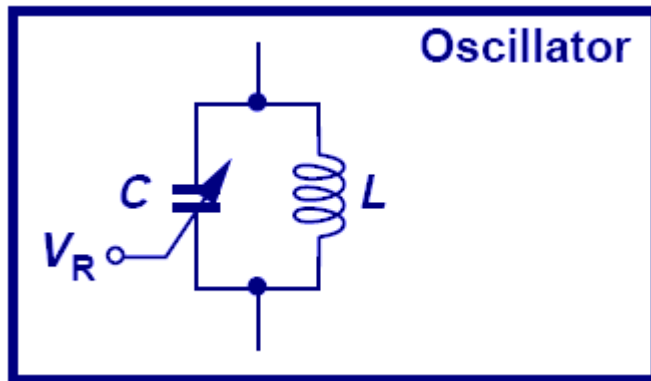
(a)



(b)

- Inverzno polarisana dioda može se posmatrati kao kondenzator.
- Promjenom V_R , širina prostornog tovara se mijenja, mijenjajući vrednost kapacitivnosti;
- Inverzno polarisana dioda je zapravo naponom kontrolisani kondenzator.

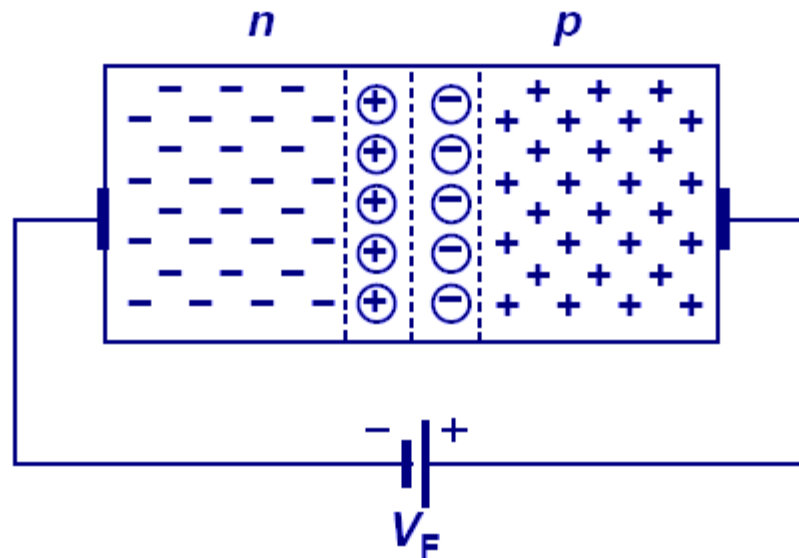
Naponom kontrolisani oscilator



$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

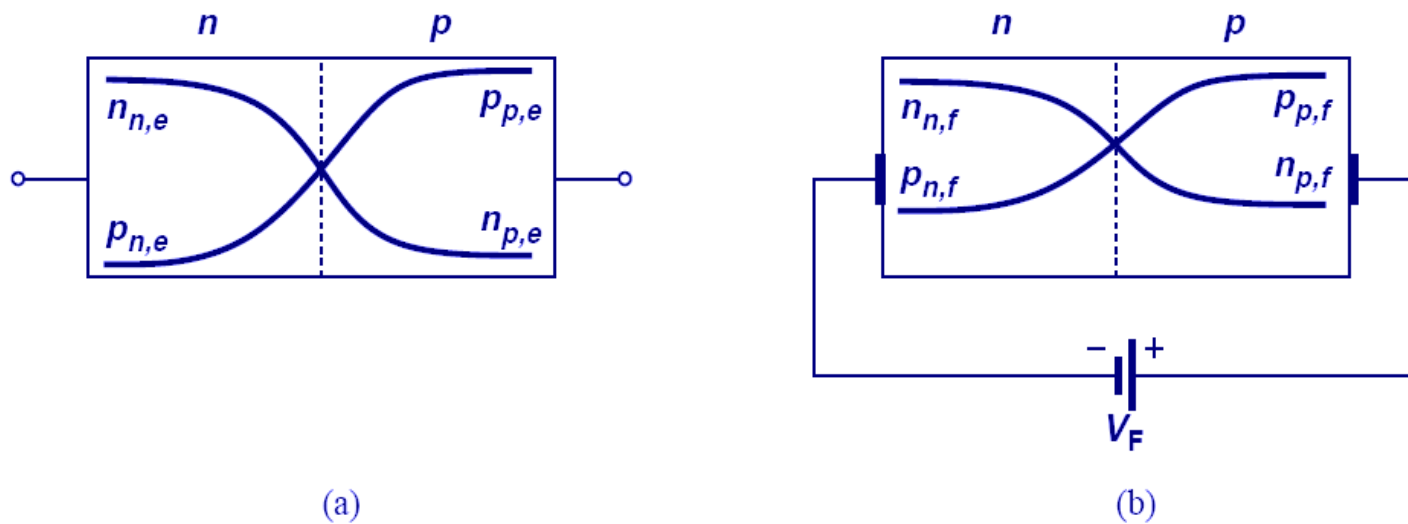
- Veoma važna primjena obrnuto polarisane diode je za realizaciju naponom kontrolisanog oscilatora, u kome se koristi LC oscillatorno kolo.
- Promjenom V_R može se promijeniti C , što opet menja frekvenciju oscilovanja.

Direktna polarizacija diode



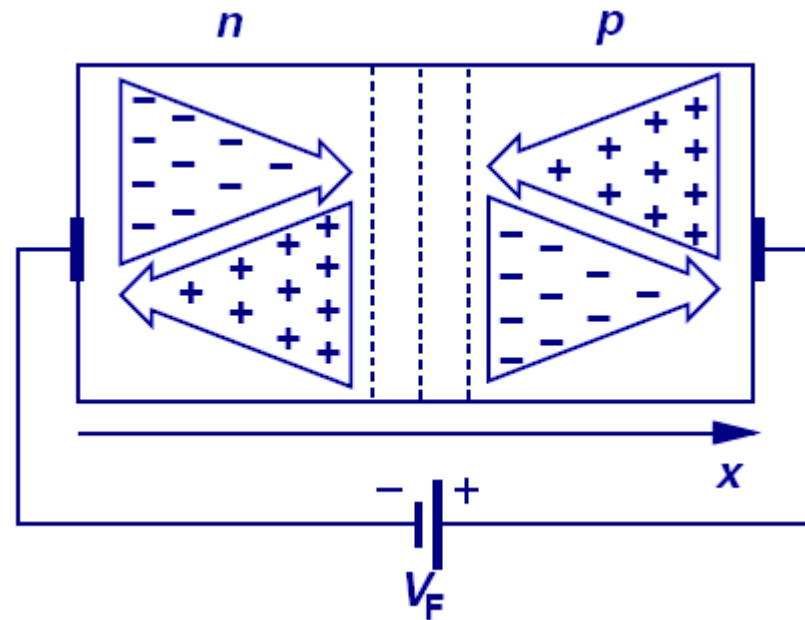
- Kada je dio diode N tipa na nižem potencijalu od dijela tipa P, dioda je direktno polarisana.
- Direktnom polarizacijom smanjuje se širina oblasti prostornog tovara i smanjuje se ugrađeno električno polje.

Nosioci naelektrisanja u direktno polarisanom PN spoju



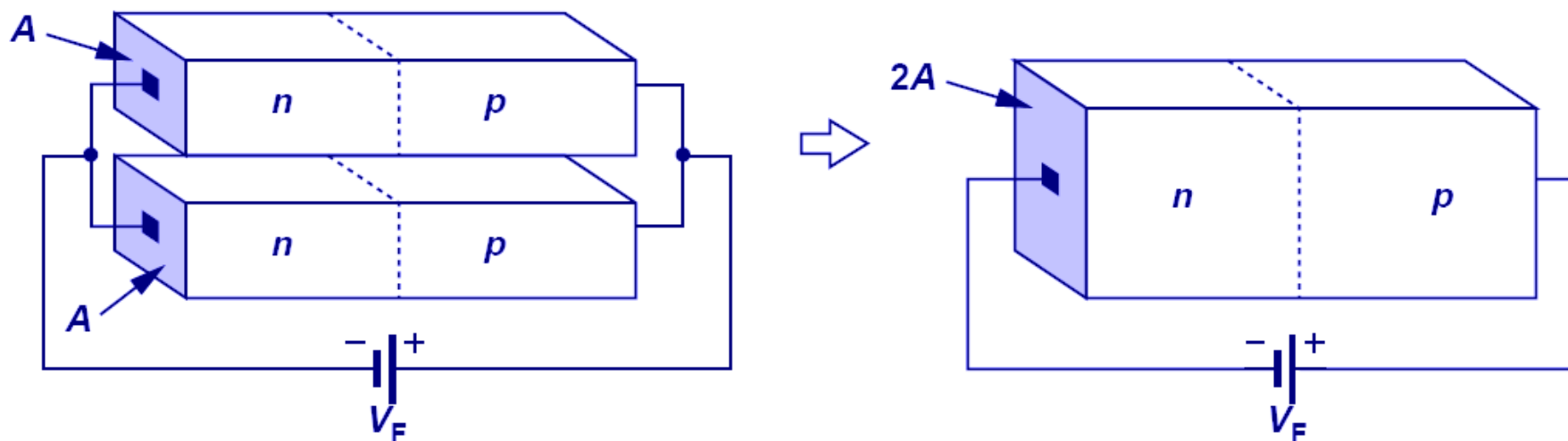
- **Direktnom polarizacijom, usljed smanjenja ugrađenog polja broj manjinskih nosioca naelektrisanja u svakom regionu uz oblast prostornog tovara se povećava.**
- **Difuzione struje se povećavaju i obezbjeđuju povećanje manjinskih nosioaca.**
- **Usljed rekombinacije manjinskih i većinskih nosilaca naelektrisanja, koncentracija manjinskih nosilaca opada kako se ide duplja u P ili N region.**

Direktno polarisana dioda



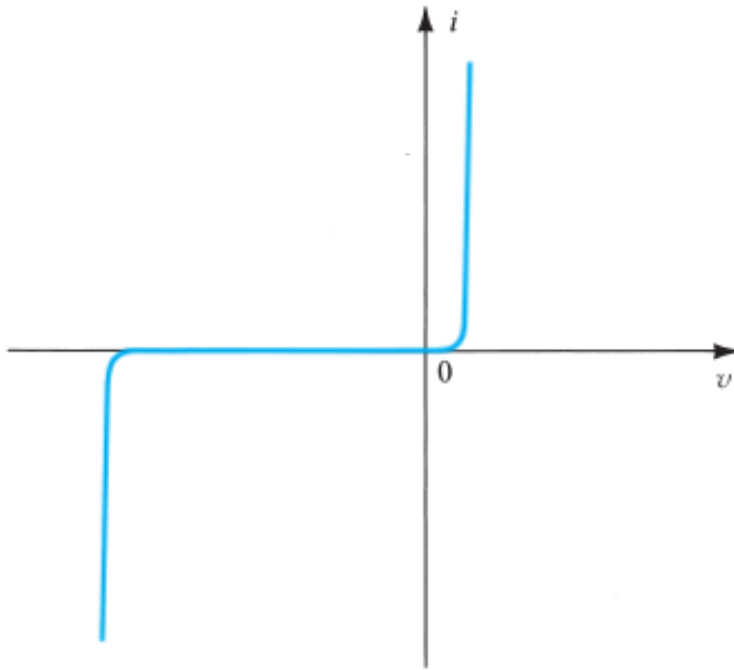
- Velika difuziona struja kroz spoj.
- Kako se ide dublje u P i N region, sve više dominira struja rekombinacije.
- Zbir ovih dviju struja rezultira konstantnom vrijednošću.

Paralelni povezani PN spojevi (diode)



- Kako je struja PN spoja proporcionalna njegovom poprečnom presjeku, dva PN spoja u paraleli će imati dvostruku poprečni presjek, odnosno dvostruku struju.

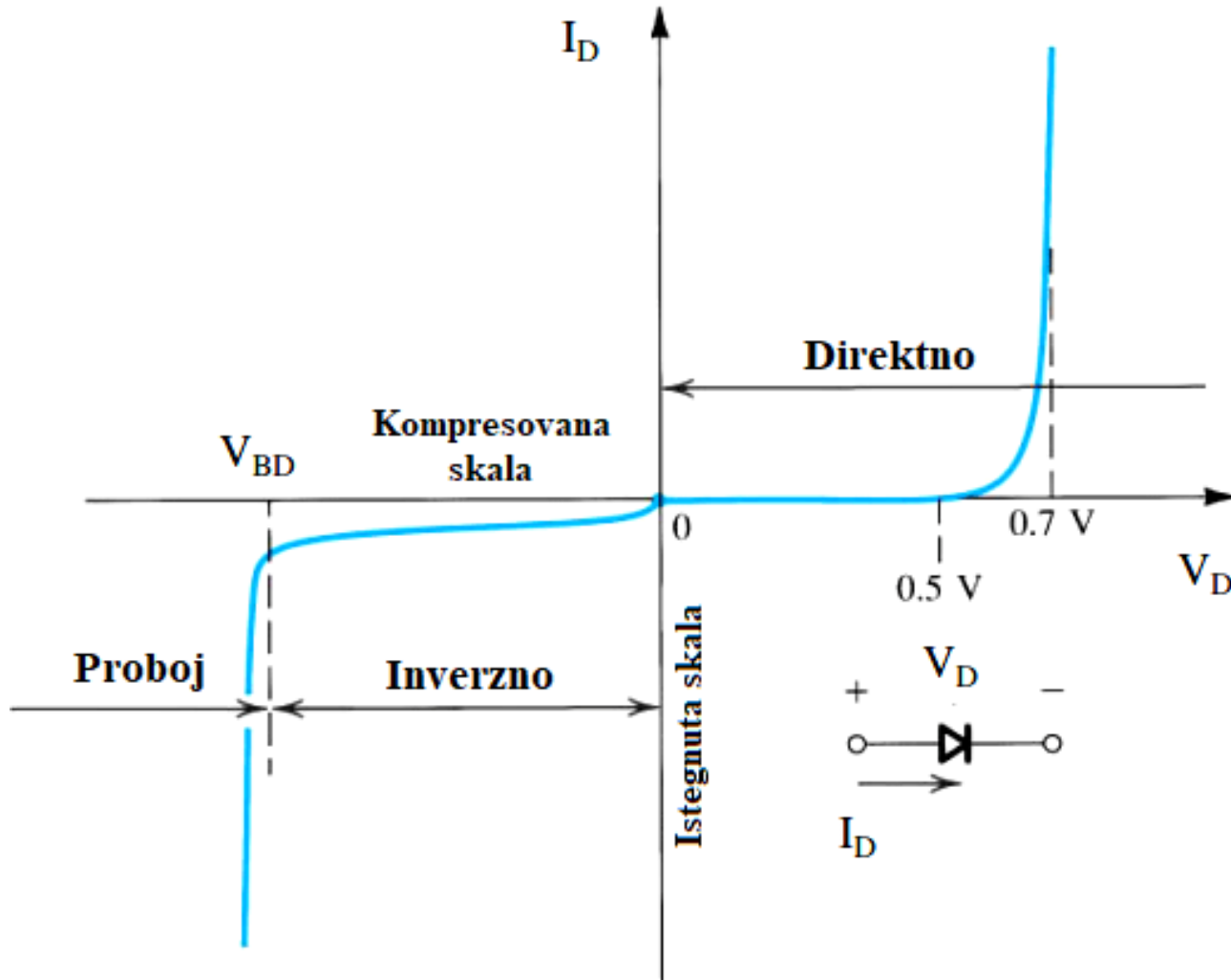
Srujno-naponska (IV) karakteristika diode



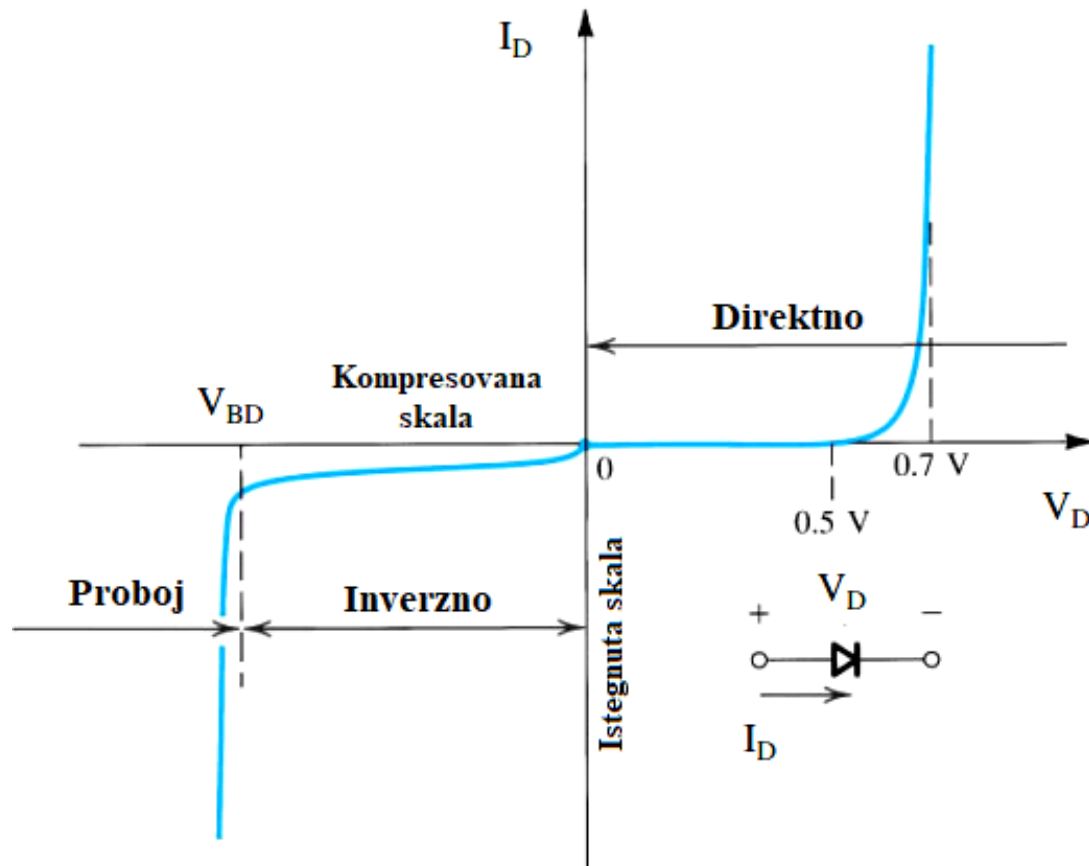
$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

- **Štrujno naponska karakteristika diode (PN spoja) je eksponencijalna pri direktnoj polarizaciji i približno konstantna pri inverznoj polarizaciji.**

Srujno-naponska (IV) karakteristika diode

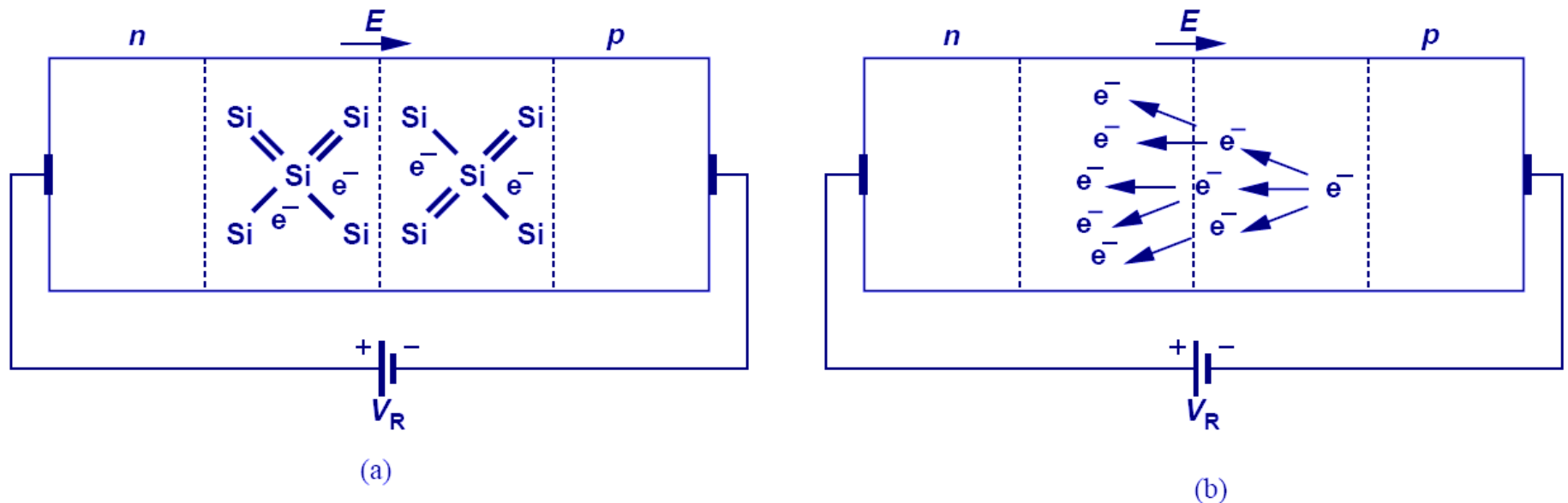


Inverzni proboj



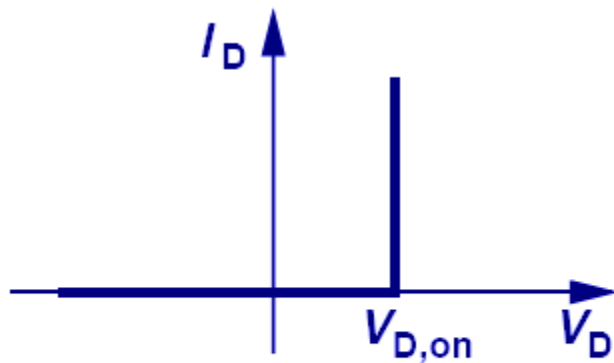
- Kada se primijeni visok napon inverzne polarizacije dolazi do proboja.

Zenerov vs. lavinski proboj

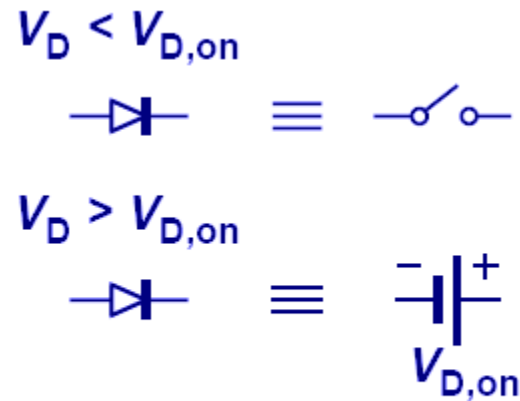


- Zenerov proboj je rezultat postojanja jakog električnog polja u oblasti prostornog tovara koje izbija elektrone i šupljine iz njihovih kovalentnih veza.
- Lavinski proboj je rezultat sudara elektrona ili šupljina sa nepokretnim jonima unutar oblasti prostornog tovara.

Model diode – konstantni napon



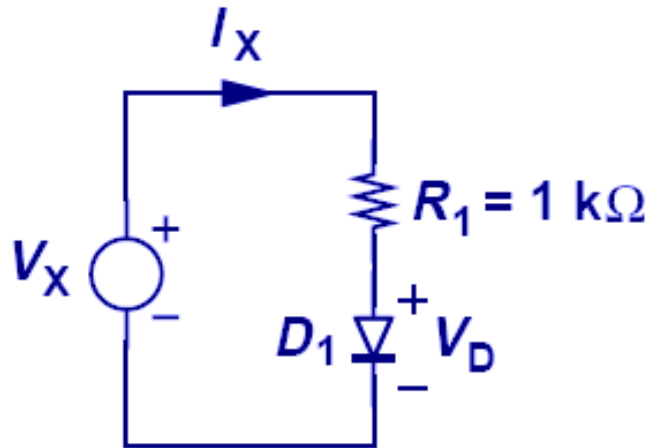
(a)



(b)

- Dioda se ponaša kao prekid u kolu ako je $V_D < V_{D,on}$ i kao izvor konstantnog napona ako je V_D teži da pređe $V_{D,on}$.
- Obično se uzima da je $V_{D,on} \approx 0.7V$

Primjer: Izračunavanje struje kroz diodu



$$V_X = I_X R_1 + V_D = I_X R_1 + V_T \ln \frac{I_X}{I_S}$$

Ako se uzme da je V_D konstantno i jednako 0.7V, dobija se:

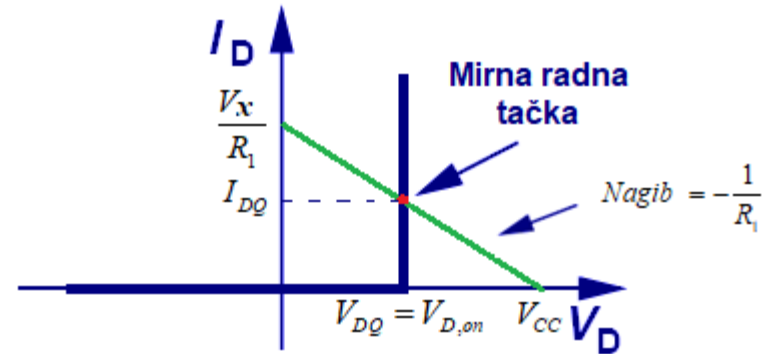
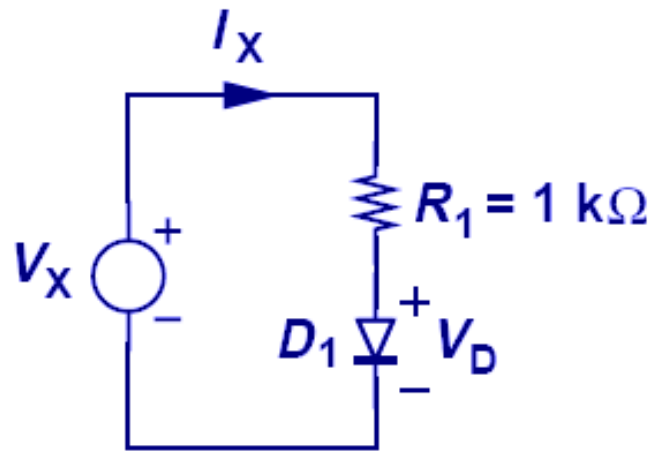
$$V_X = I_X R_1 + V_D \quad I_X = \frac{V_X - V_D}{R_1}$$

$$I_X = 2.3 \text{ mA} \quad \text{za} \quad V_X = 3 \text{ V}$$

$$I_X = 0.3 \text{ mA} \quad \text{za} \quad V_X = 1 \text{ V}$$

- Ovaj primjer pokazuje pojednostavljenje koje donosi uzimanje da je napon na diodi konstantan.
- U slučaju eksponencijalne zavisnosti, bio bi potreban iterativni postupak za nalaženje vrijednosti struje.

Mirna radna tačka – model diode konstantni napon



Iz kola sa slike imamo da je linija opterećenja:

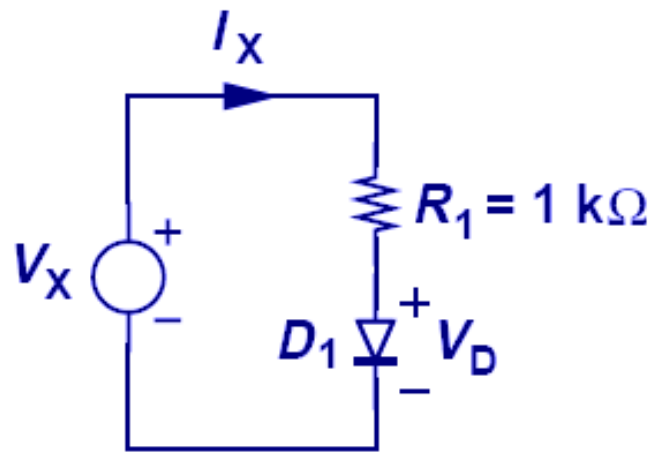
$$V_X = I_D R_1 + V_D \Rightarrow I_D = -\frac{V_D}{R_1} + \frac{V_X}{R_1}$$

Uzimanjem modela diode sa konstantnim naponom imamo da je:

$$V_D = V_{D,on}$$

U presjeku linije opterećenja i karakteristike diode dobijamo radnu tačku, tzv mirnu radnu tačku. Presjekom je određena struja kroz diodu

Mirna radna tačka – eksponencijalni model diode



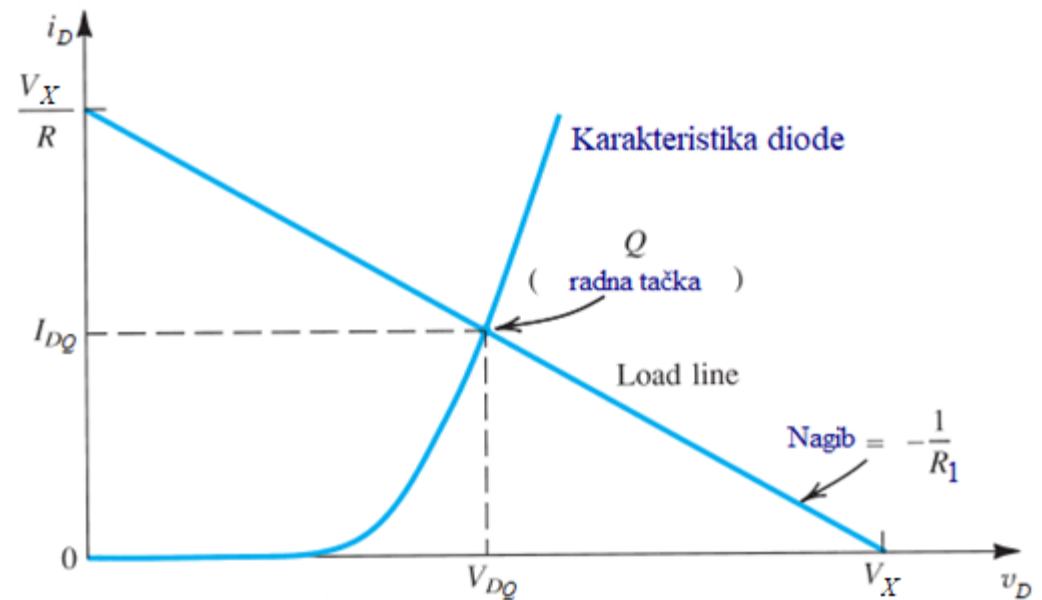
Iz kola sa slike imamo da je linija opterećenja:

$$V_X = I_D R_1 + V_D \Rightarrow I_D = -\frac{V_D}{R_1} + \frac{V_X}{R_1}$$

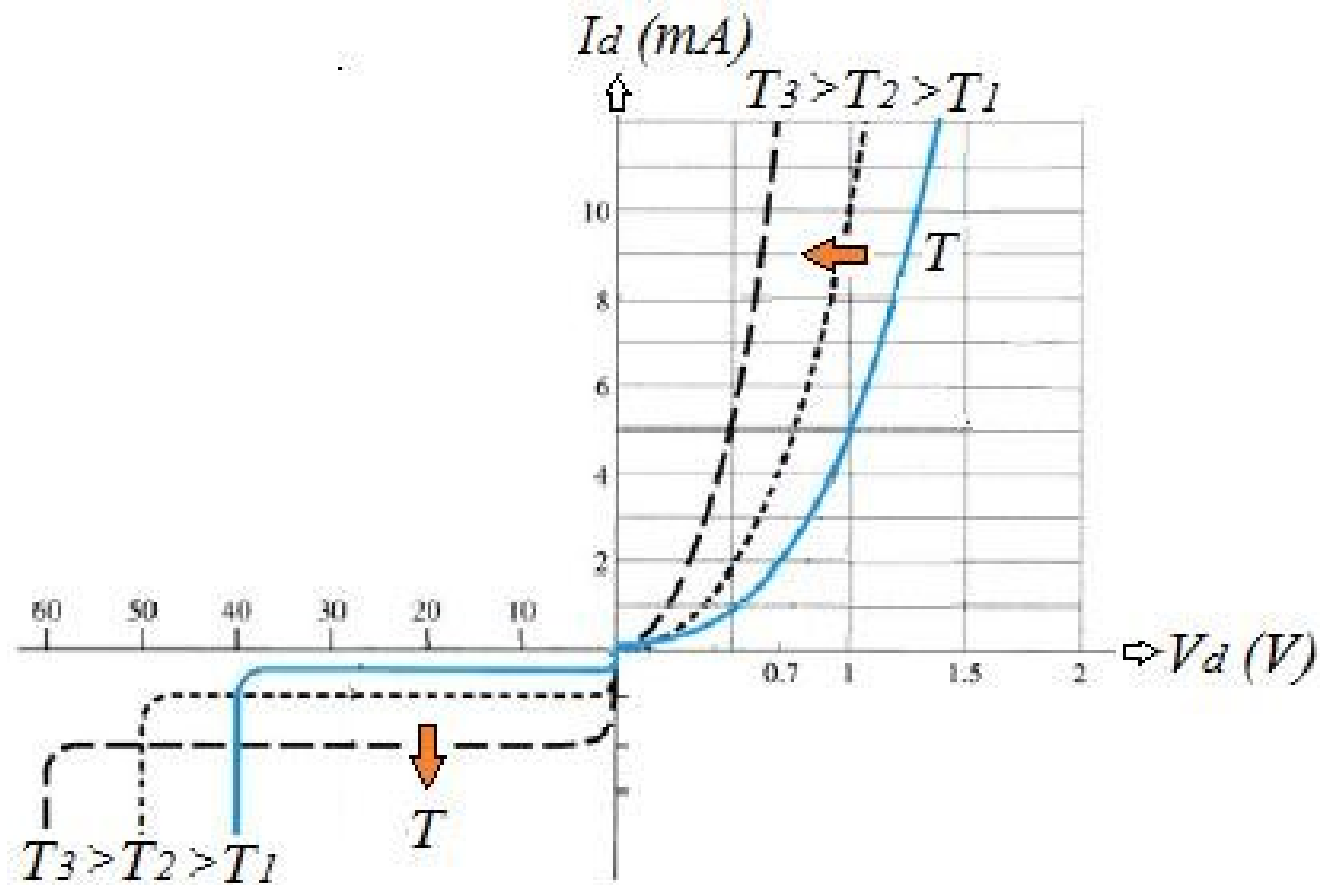
Uzimanjem eksponencijalnog modela diode imamo da je:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

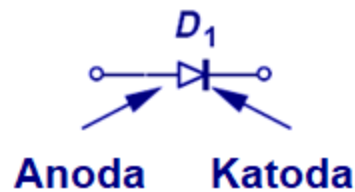
U presjeku linije opterećenja i karakteristike diode dobijamo radnu tačku, tzv mirnu radnu tačku.



Uticaj temperature na IV karakteristiku



Idealna dioda



(a)

Direktna polarizacija

$$V_{\text{anoda}} > V_{\text{katoda}}$$

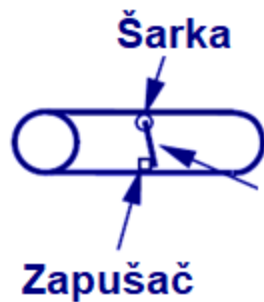


Inverzna polarizacija

$$V_{\text{anoda}} < V_{\text{katoda}}$$



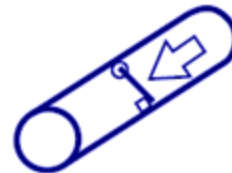
(b)



Propusan smjer



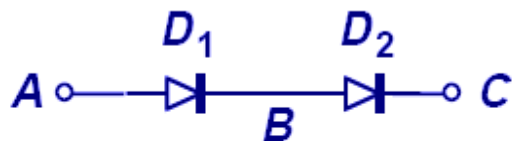
Nepropusan smjer



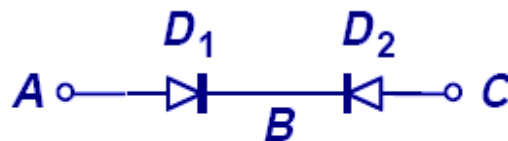
(c)

- Kod idealne diode, ako napon na diodi postane pozitivan, protekne struja, dioda se modelira kratkim spojem.
- Ako napon na diodi postane negativan, diode se modelira prekidom.
- Analogno cijevi koja propušta vodu samo u jednom smjeru.

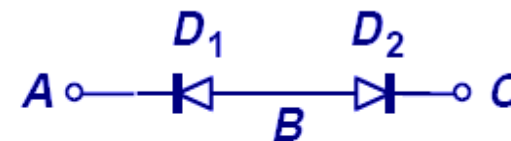
Diode povezane u seriju



(a)



(b)

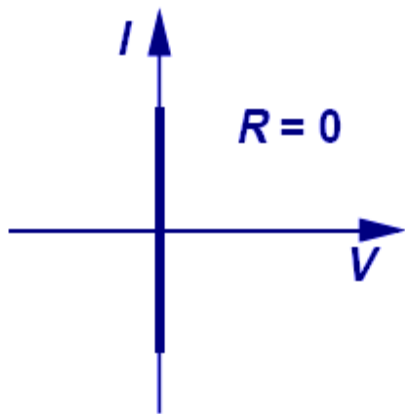


(c)

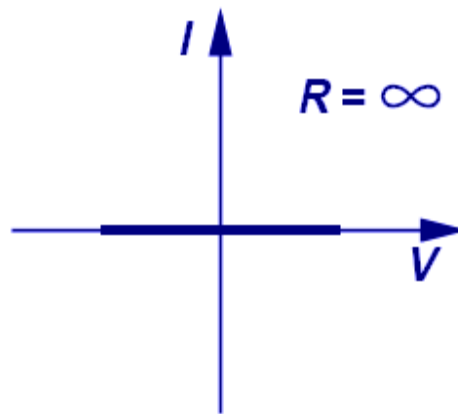
- Diode se ne mogu povezivati u seriju slučajno. Za spojeve iznad, samo spoj a) može provoditi struju A do C.

IV karakteristike idealne diode

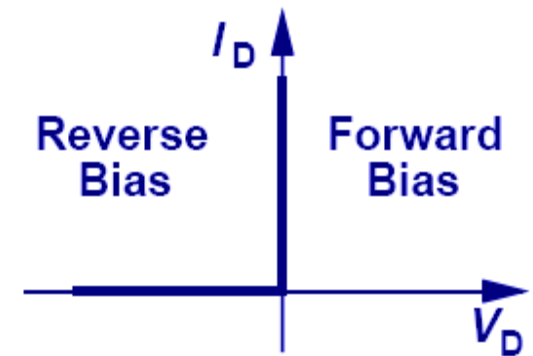
$$R = 0 \Rightarrow I = \frac{V}{R} = \infty \quad R = \infty \Rightarrow I = \frac{V}{R} = 0$$



(a)

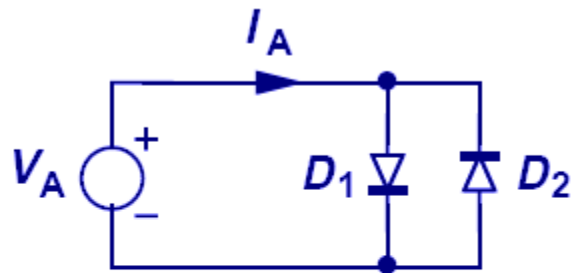


(b)

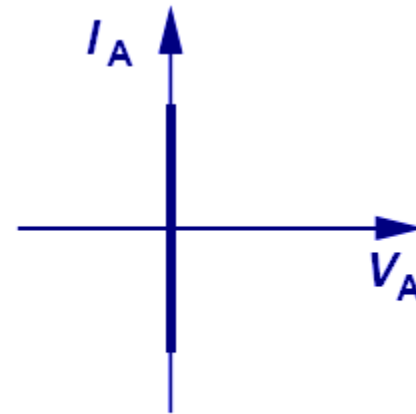


- Ako je napon na diode veći od nule, otpornost diode je nula i struju diode određuje ostatak kola.
- Ako je napon na diodi manji od nule, otpornost diode postaje beskonačna a struja kroz diodu je nula.

Anti-paralalno povezane idealne diode



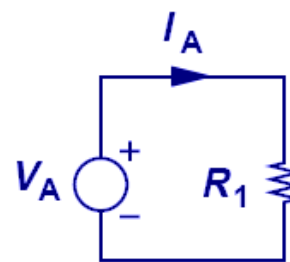
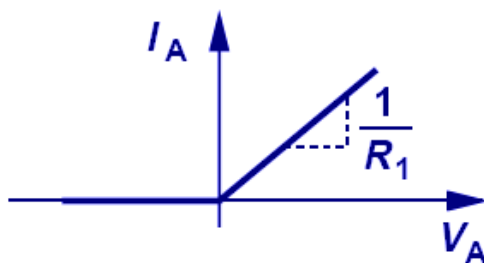
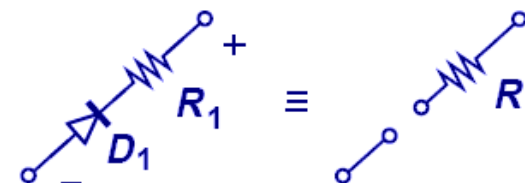
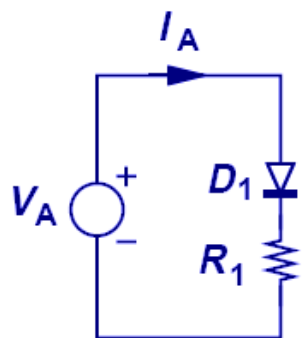
(a)



(b)

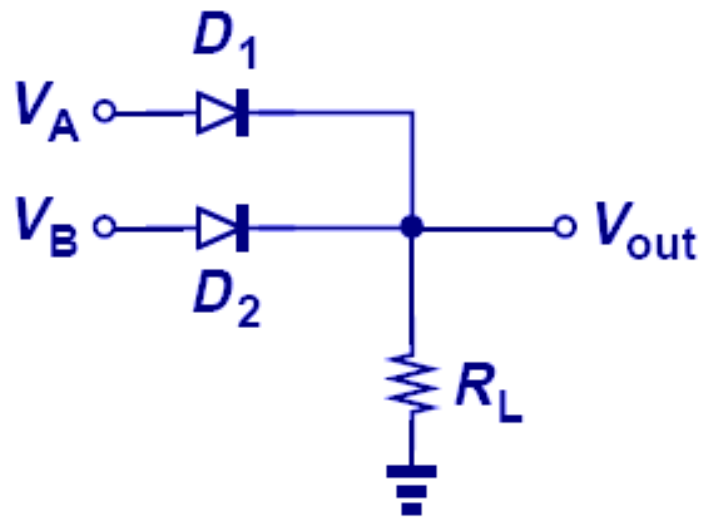
- Ako se dvije idealne diode povežu anti-paralelno, ponašaju se kao kratak spoj.

Idealna dioda u kombinaciji sa otpornikom

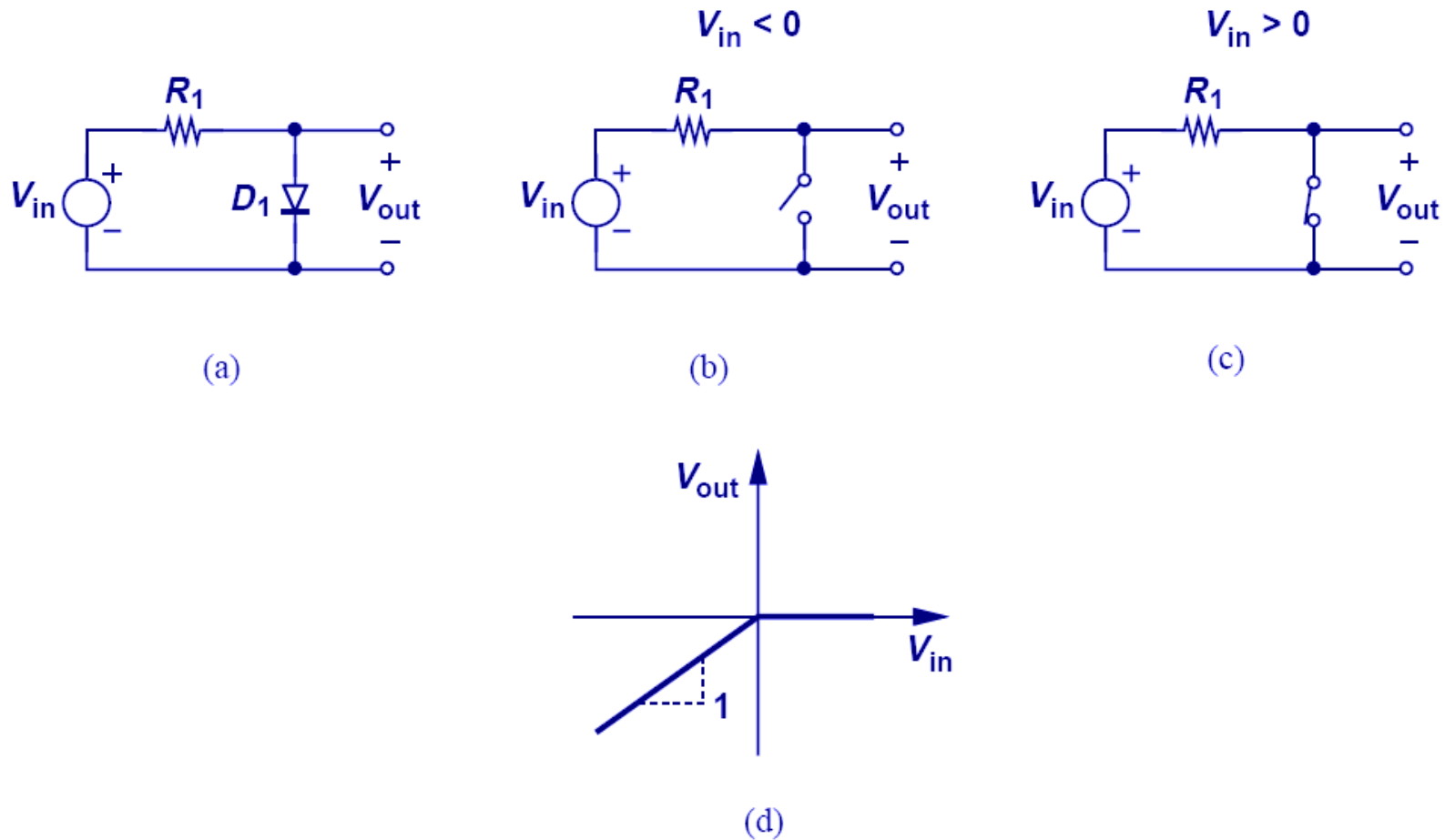


- IV karakteristika ovakvog kola je nula za negativne napone i u skladu sa Ohm-ovim zakonom za pozitivne napone.

$\text{MAX}(V_A, V_B)$



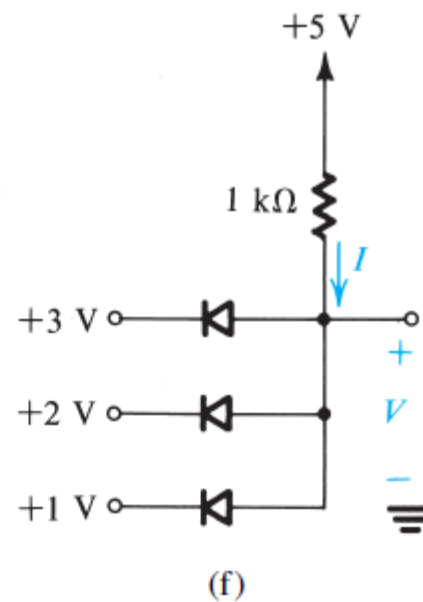
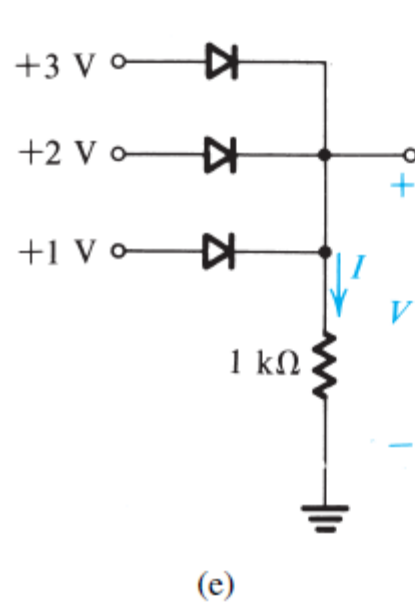
Ulazno/Izlazne karakteristike



- Kada je V_{in} manji od nule, diode je prekid, pa je $V_{out} = V_{in}$.
- Kada je V_{in} veće od nule, diode je kratak spoj, pa je $V_{out} = V_D$.

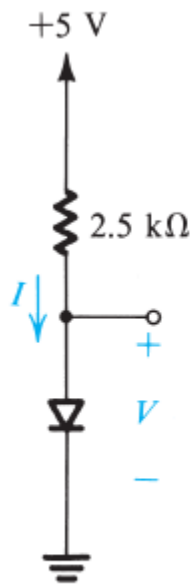
Primjer

Uzimajući model diode sa konstantnim naponom, naći vrijednosti struje I i napona V u kolima na slici.

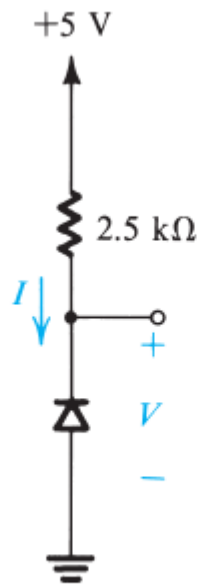


Primjer

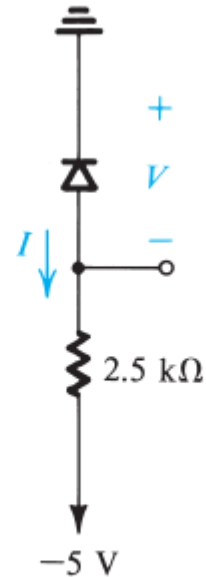
Uzimajući model diode sa konstantnim naponom, naći vrijednosti struje I i napona V u kolima na slici.



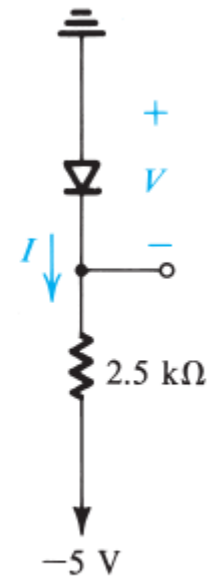
(a)



(b)



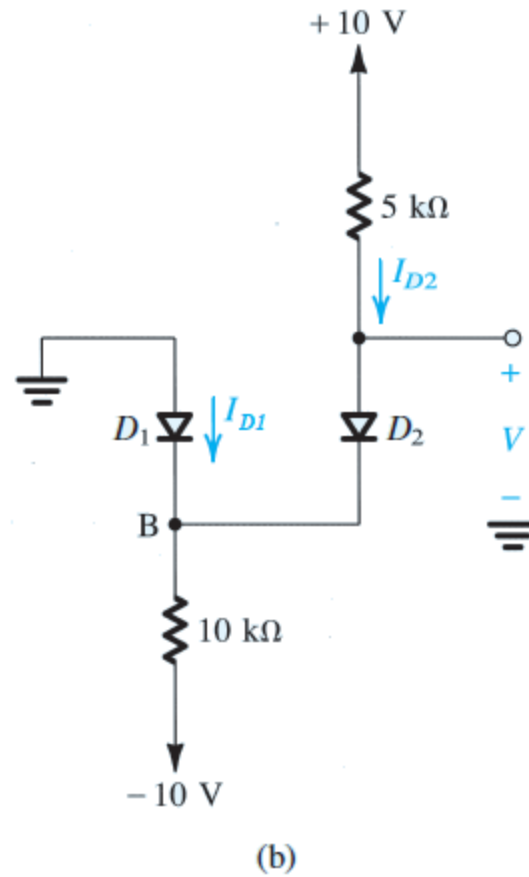
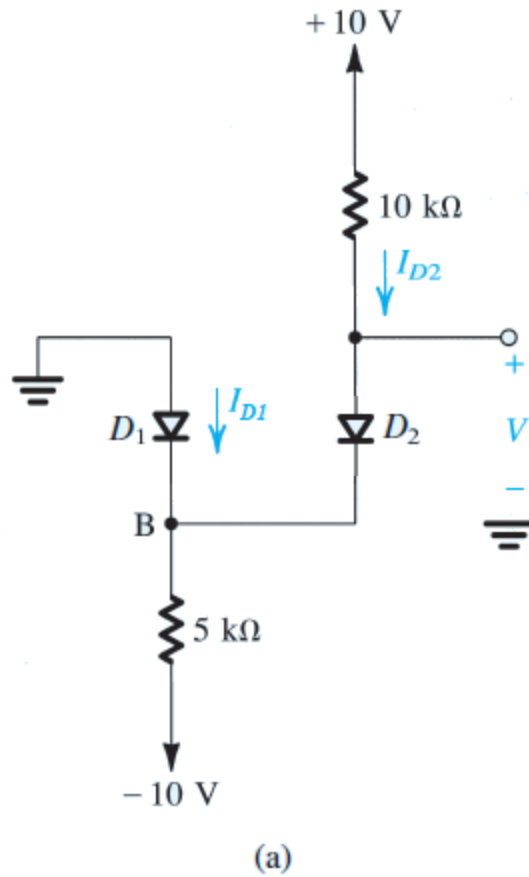
(c)



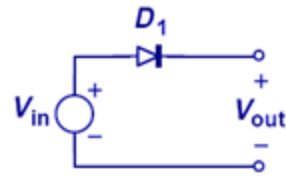
(d)

Primjer

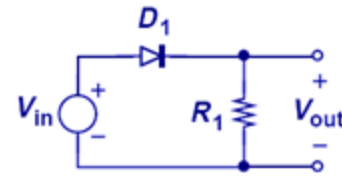
Uzimajući model diode sa konstantnim naponom, naći vrijednosti struja I_{D1} i I_{D2} i napona V u kolima na slici.



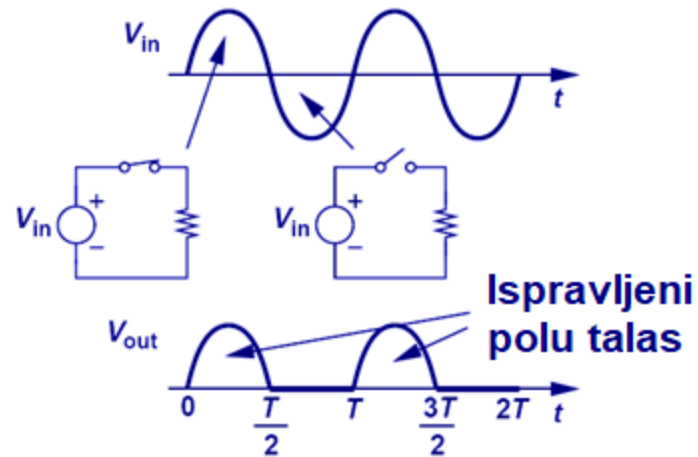
Primjene dioda: Ispravljač



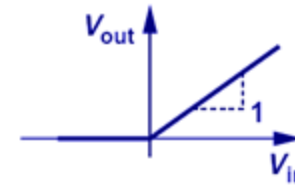
(a)



(b)



(c)



(d)

- Ispravljač je uređaj koji propušta pozitivni polu-talas sinusoidalnog napona i blokira negativni ili obrnuto.
- Kada je V_{in} veći od 0, diode je kratka veza, pa je $V_{out} = V_{in}$; međutim, kada je V_{in} manji od 0, diode je prekid, nema struje kroz R_1 , $V_{out} = I_{R1}R_1 = 0$.

Srednja vrijednost izlaznog signala

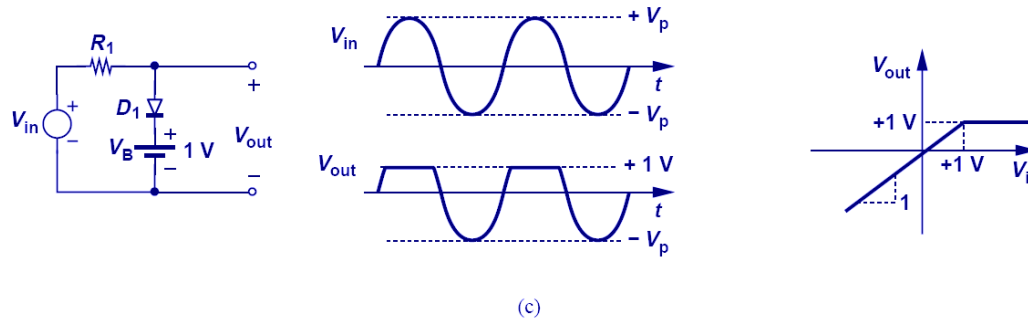
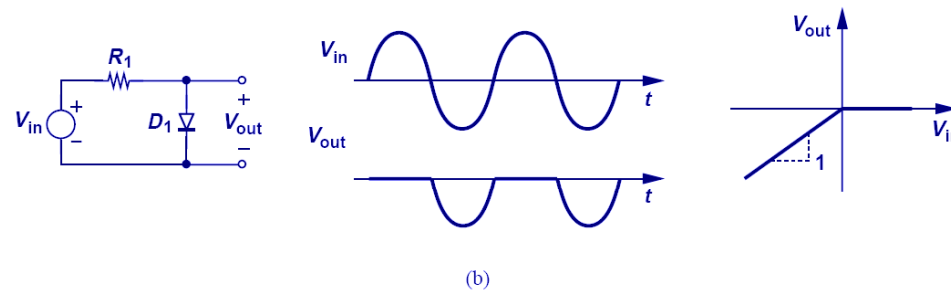
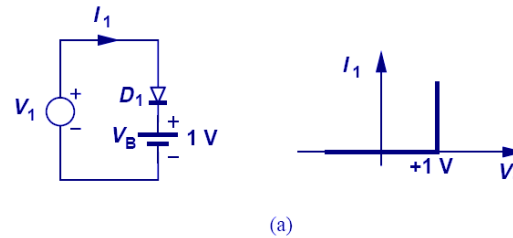
$$V_{out} = V_p \sin \omega t = 0 \quad \text{for } 0 \leq t \leq \frac{T}{2}$$

$$V_{out,avg} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{out}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_p \sin \omega t dt$$

$$= \frac{1}{T} \frac{V_p}{\omega} [-\cos \omega t]_0^{T/2} = \frac{V_p}{\pi} \quad \text{for } \frac{T}{2} \leq t \leq T$$

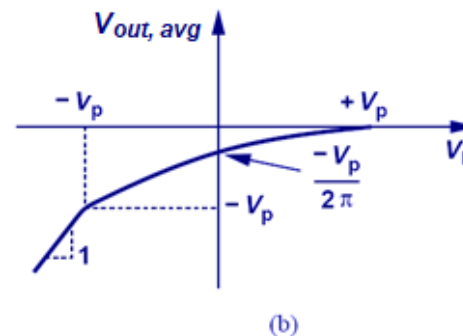
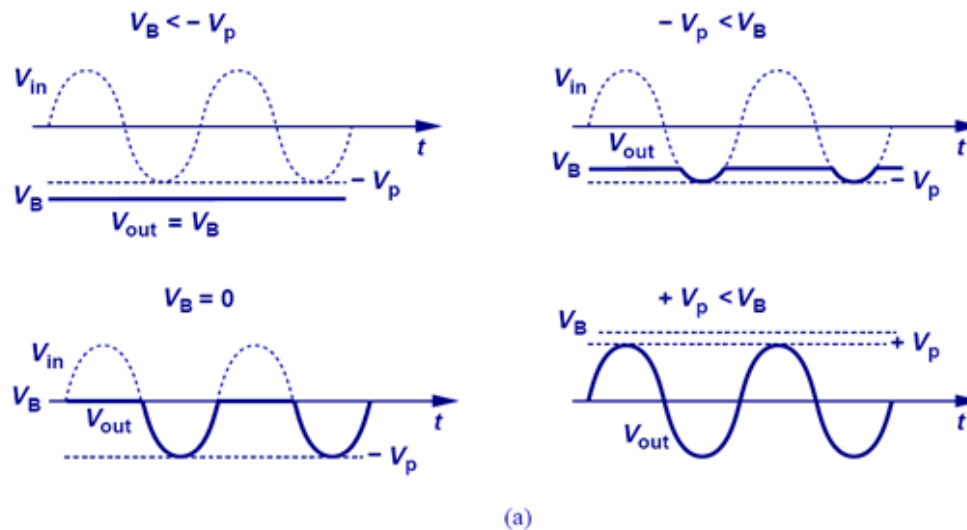
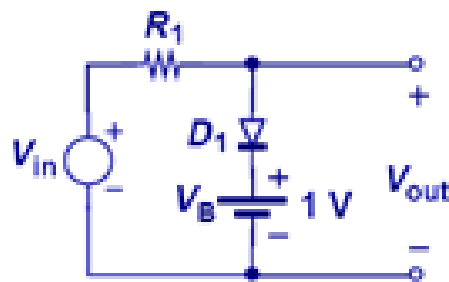
- Srednja vrijednost ispravljenog izlaznog napona može se koristiti kao indikator jačine signala.
- Proporcionalna je amplitudi ulaznog signala.

Primjene dioda: Limiter



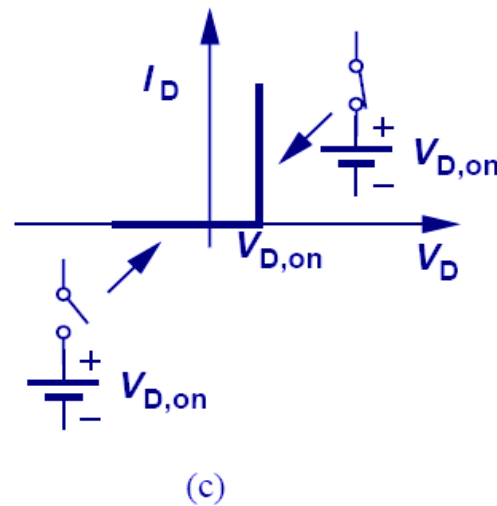
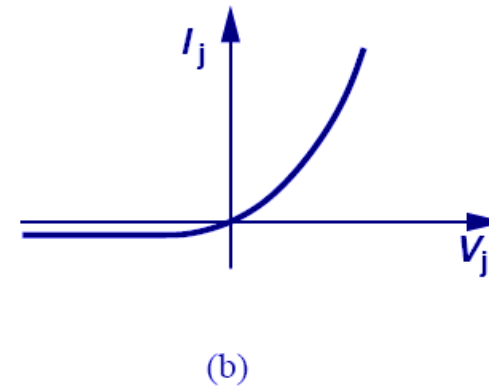
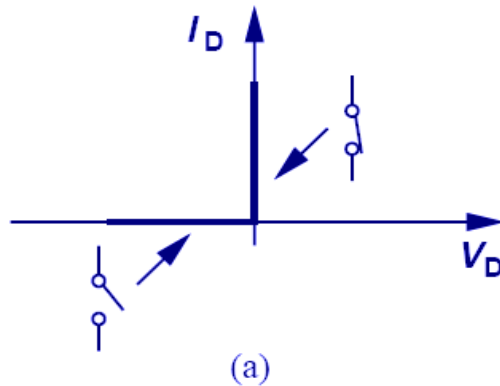
- Uloga limitera je da izlazni napon drži ispod (iznad) određene vrijednosti.
- U kolu a), dodata baterija napona 1V, obezbjeđuje da diode provede tek nakon što napon V_1 postane veći od 1 V.

Limiter: Različite vrijednosti napona baterije



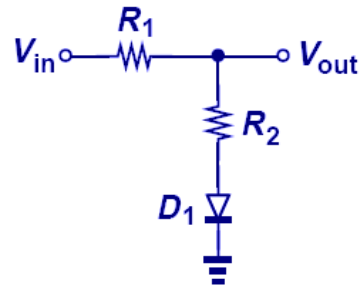
- Ispravljanje izostaje kada je V_B veći od amplitude ulaznog signala.

Modeli diode

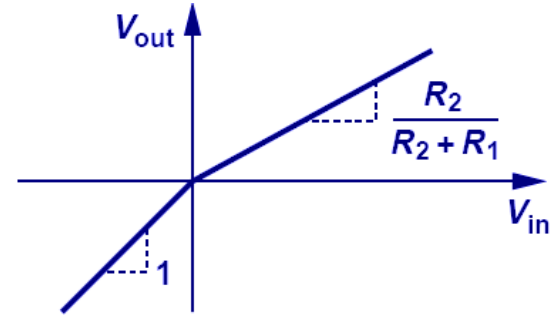


- Osim idealnog modela diode, postoje eksponencijalni i model konstantnog napona.

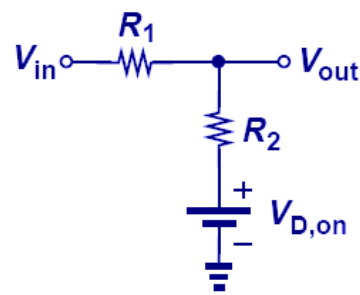
Ulazno/izlazne karakteristike sa idealnim i modelom konstantnog napona



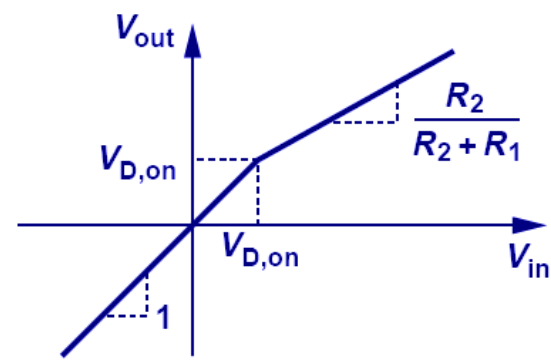
(a)



(b)



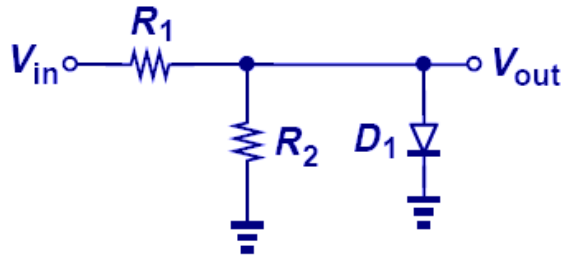
(c)



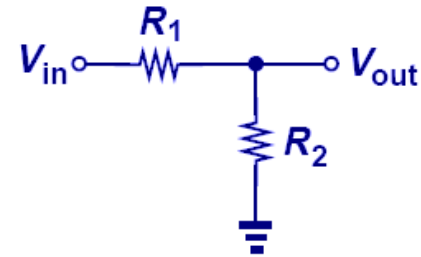
(d)

- Razlika između idealnog i modela konstantnog napona
- Dva modele dovode do različite pozicije preloma u ulazno-izlaznoj karakteristici.

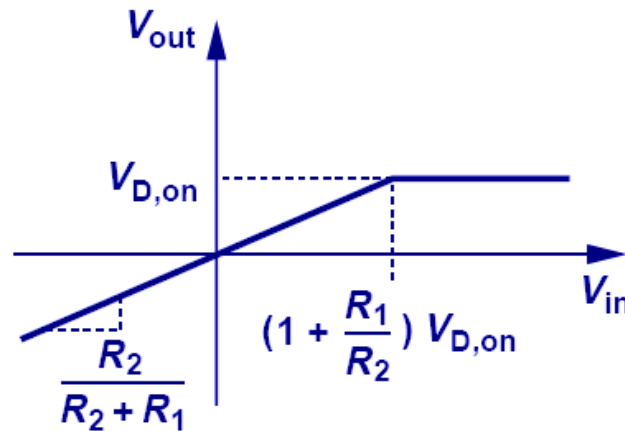
Ulazno/izlazne karakteristike upotrebom modela sa konstantnim naponom



(a)



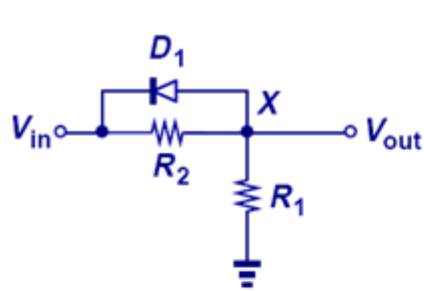
(b)



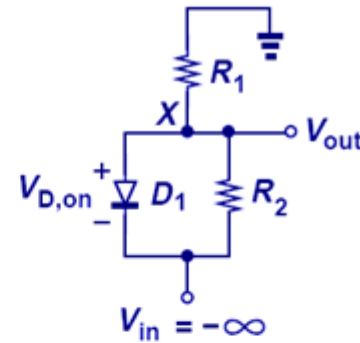
(c)

- Kada se koristi model sa konstantnim naponom, napon na diodi kada provodi više nije nula već $V_{d,on}$.

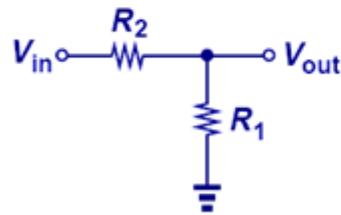
Ulazno/izlazne karakteristike upotrebom modela sa konstantnim naponom



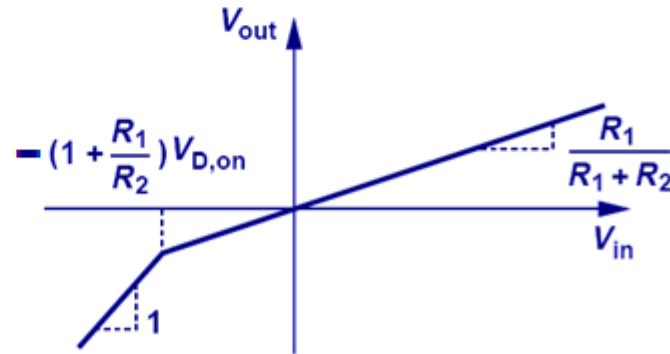
(a)



(b)

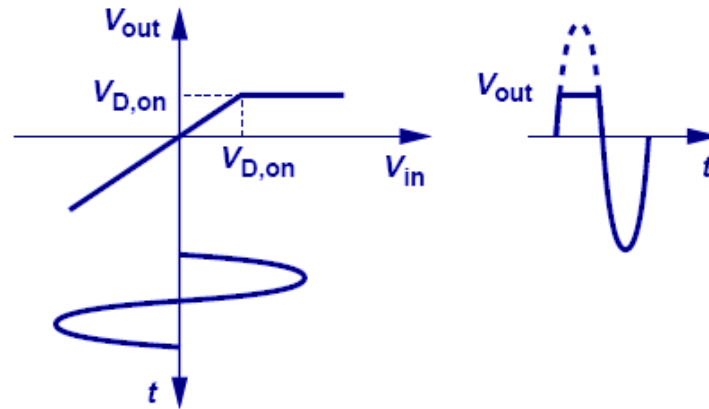
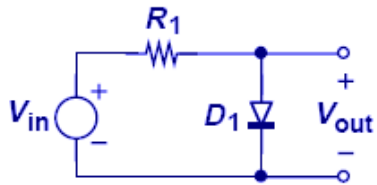


(c)

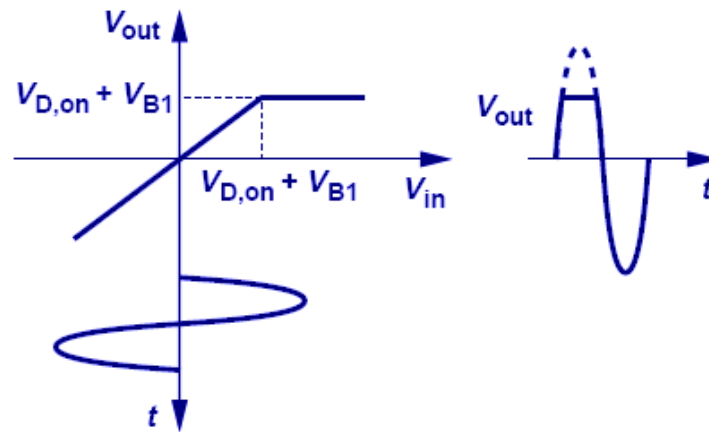
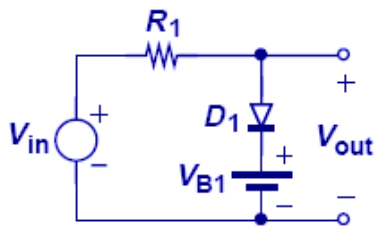


(d)

Limitiranje pozitivne poluperiode

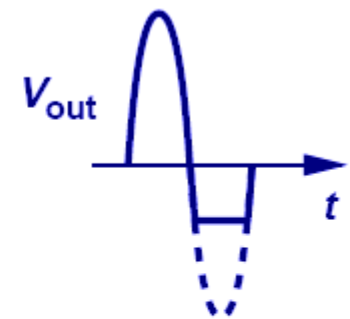
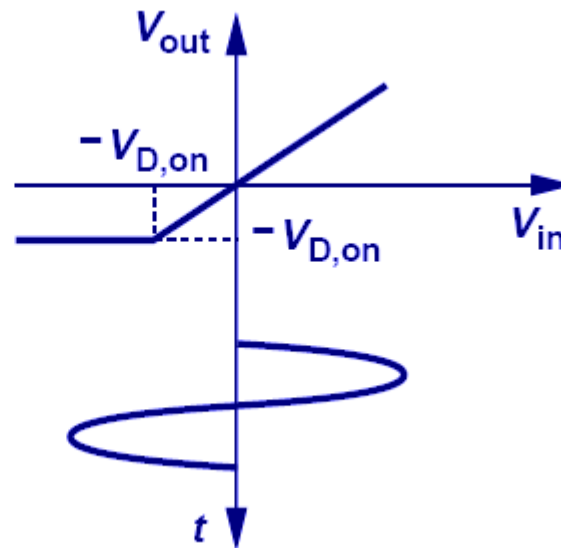
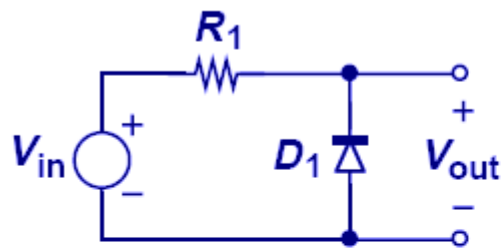


(a)

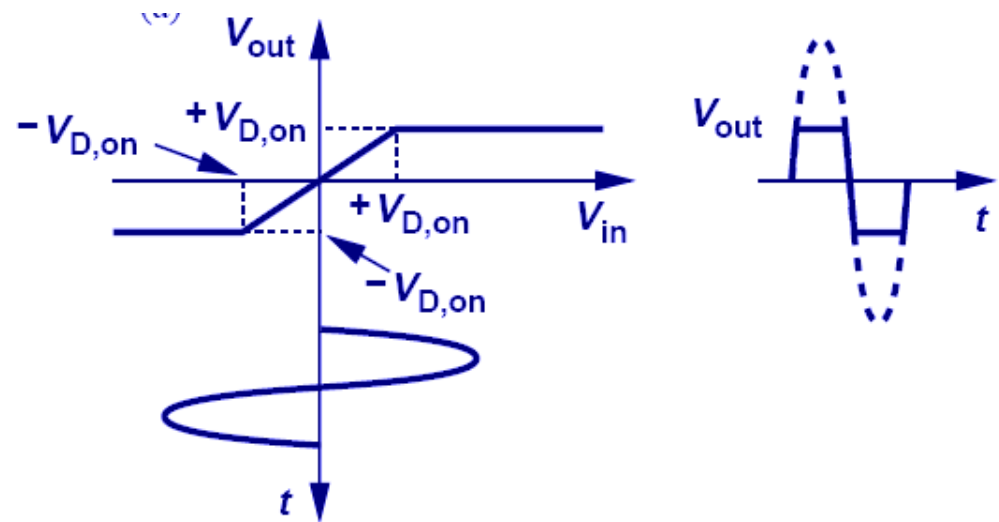
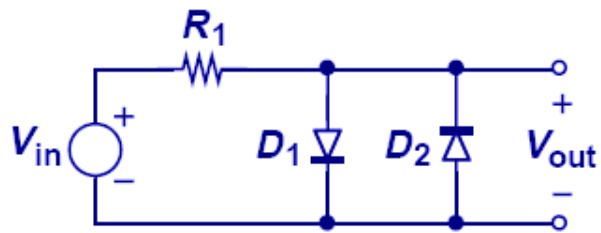


(b)

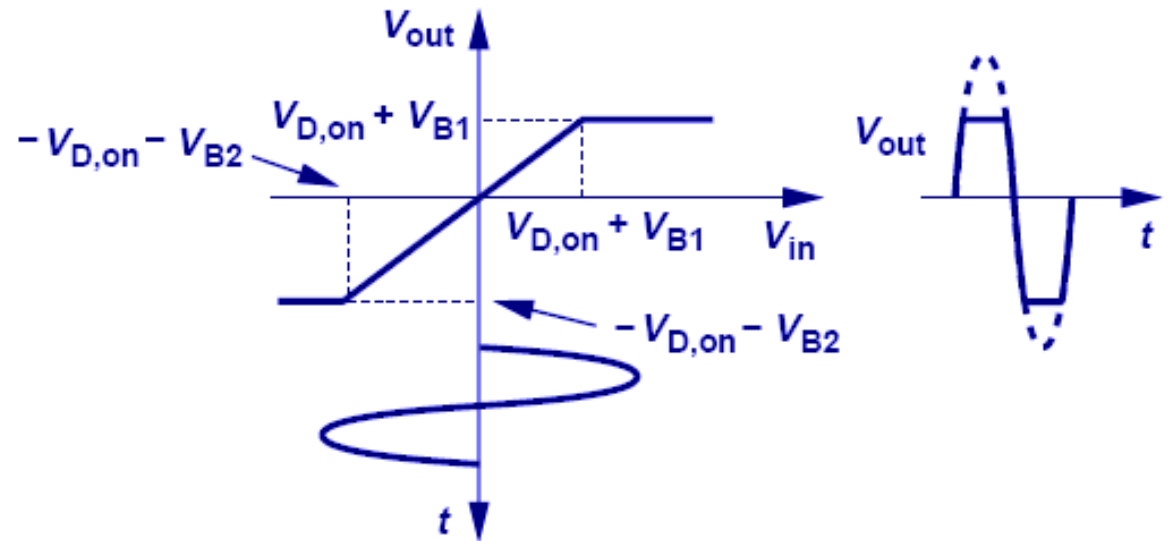
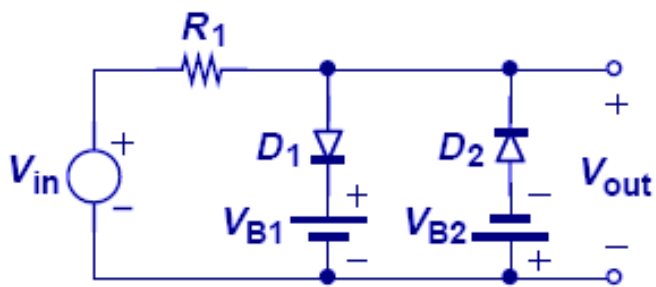
Limitiranje negativne poluperiode



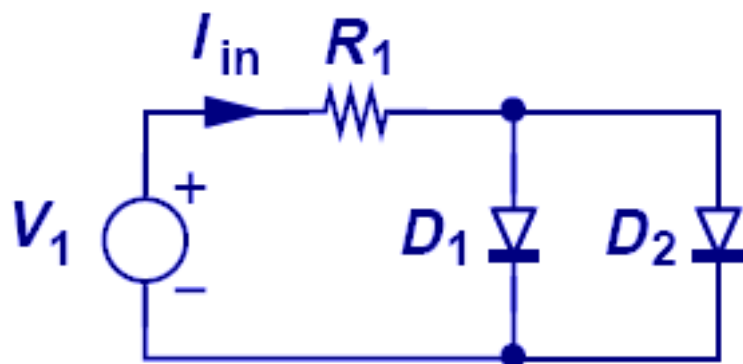
Limitiranje sa obje strane



Limitiranje sa obje strane – diode + baterije



Eksponecijalni model

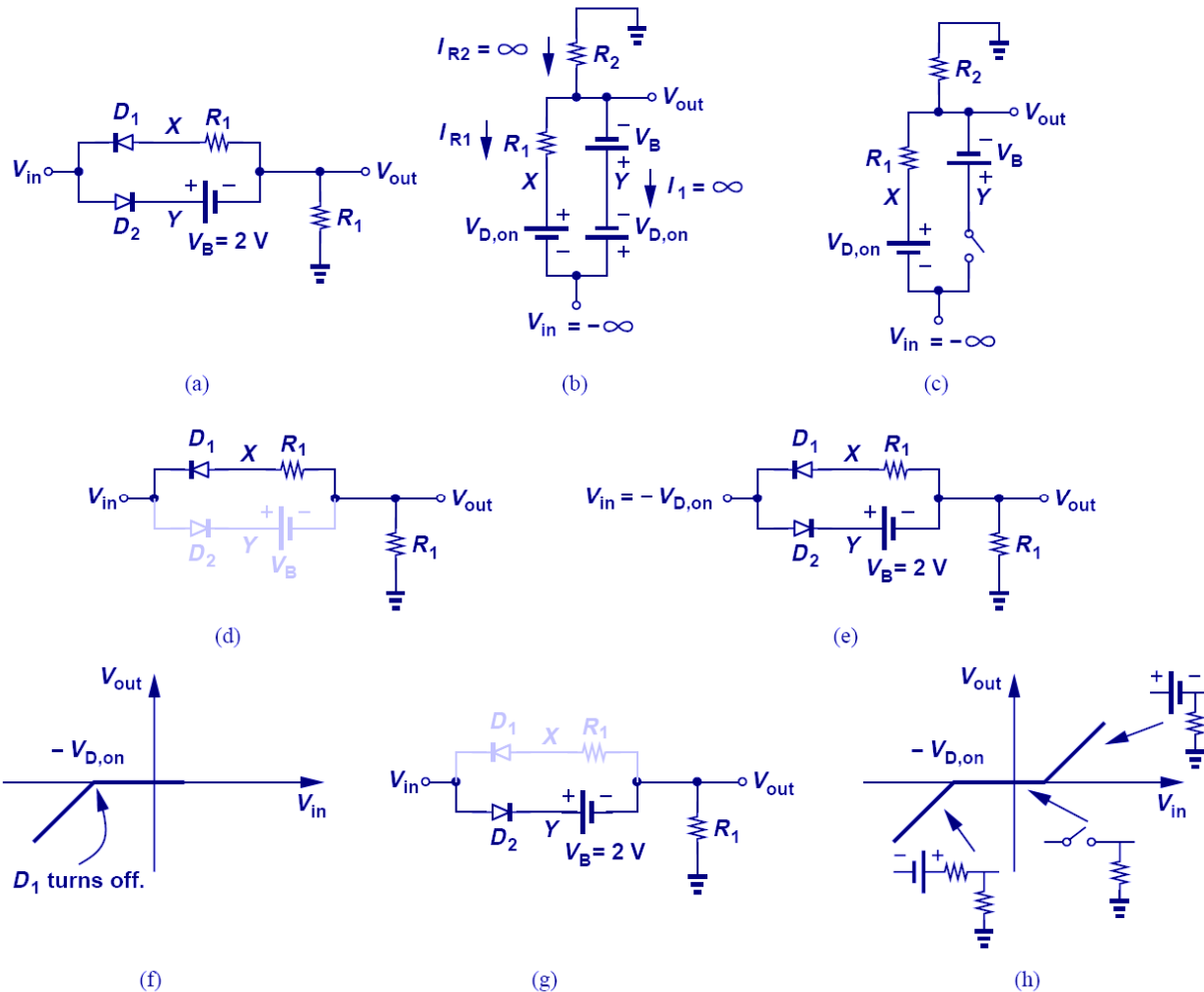


$$I_{D1} = \frac{I_{in}}{1 + \frac{I_{s2}}{I_{s1}}}$$

$$I_{D2} = \frac{I_{in}}{1 + \frac{I_{s1}}{I_{s2}}}$$

- Ukoliko diode imaju različite inverzne struje zasićenja, može se koristiti samo eksponencijalni model.
- Zbir struja dioda jednak je I_{in} , i naponi na diodama su jednaki.

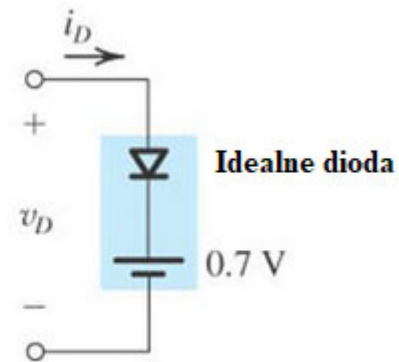
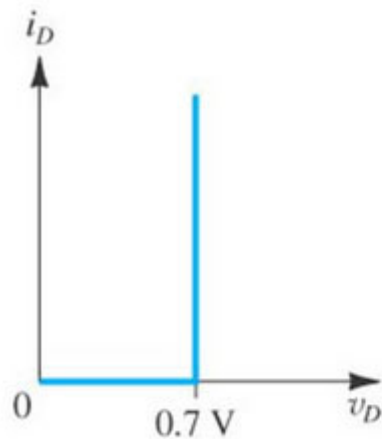
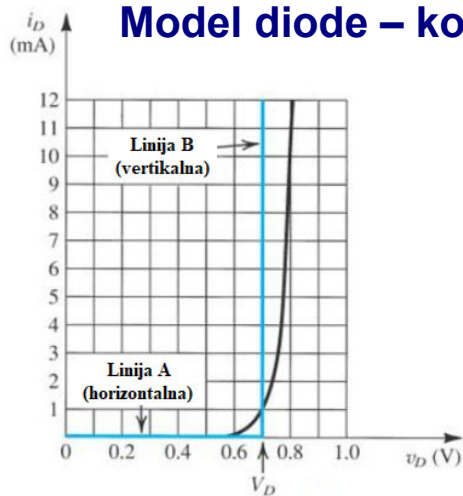
Još jedan primjer za model konstantnog napona



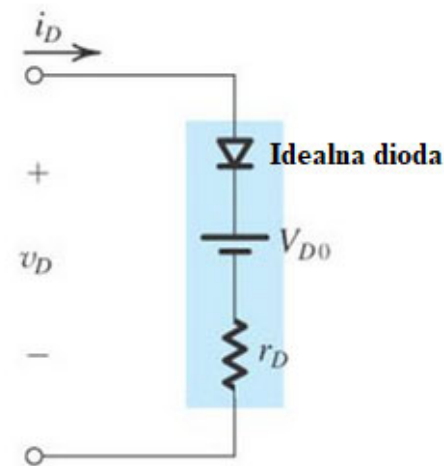
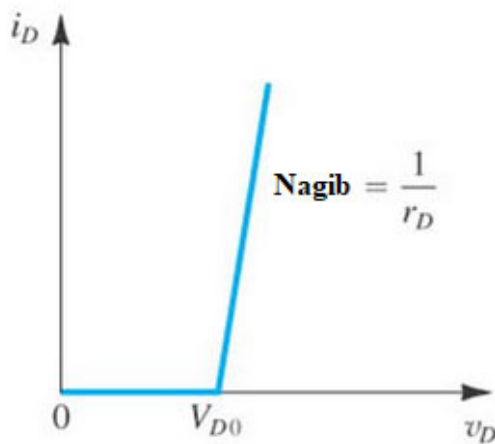
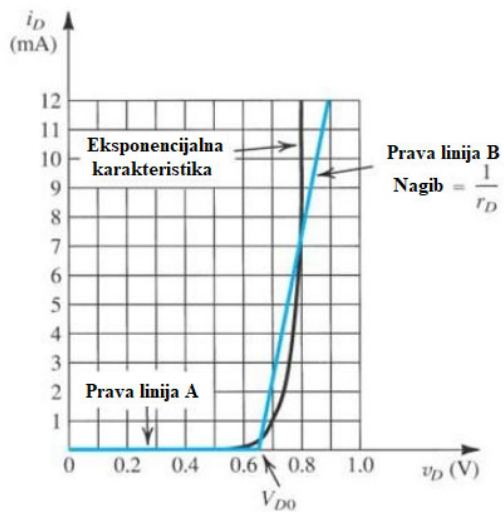
➤ Ovaj primjer pokazuje važnost dobrog početnog pretpostavljanja i pažljive provjere.

Model diode – konstantan napon + otpornost

Model diode – konstantan napon



Model diode – konstantan napon + otpornost



Model diode za male signale

Diode nalaze značajnu primjenu u kolima u kojima se nezavisne promjenjive, bilo napon ili struja, mijenjaju za relativno male iznose u okolini zadatih jednosmjernih vrijednosti, koje nazivamo koordinatama mirne radne tačke.

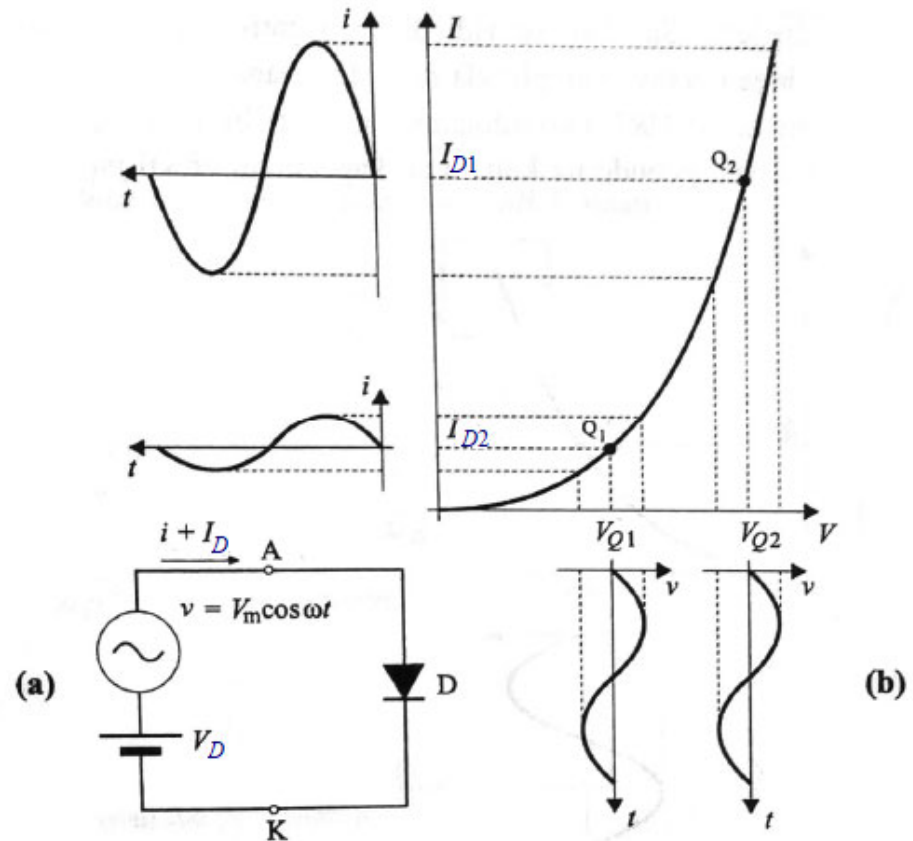
Na slici je prikazana pobuda diode iz naponskog generatora čija *ems* se može predstaviti zbirom dvije komponente:

- jedne jednosmjerne V_D i
- jedne promjenljive $v_d(t)$

Odziv u obliku struje će takođe sadržati:

- jednu jednosmjernu komponentu I_D i
- jednu promjenljivu (naizmjeničnu) komponentu $i_d(t)$

Amplituda promjenljive komponente zavisi od nagiba IV karakteristike diode.



Model diode za male signale

Ako nagib, kojim se definiše provodnost za male signale, označimo sa:

$$g_d = \frac{dI_D}{dV_D} = \frac{I_S e^{\frac{V_D}{V_T}}}{V_T} \approx \frac{I_D}{V_T}, \quad (V_D \geq 4V_T)$$

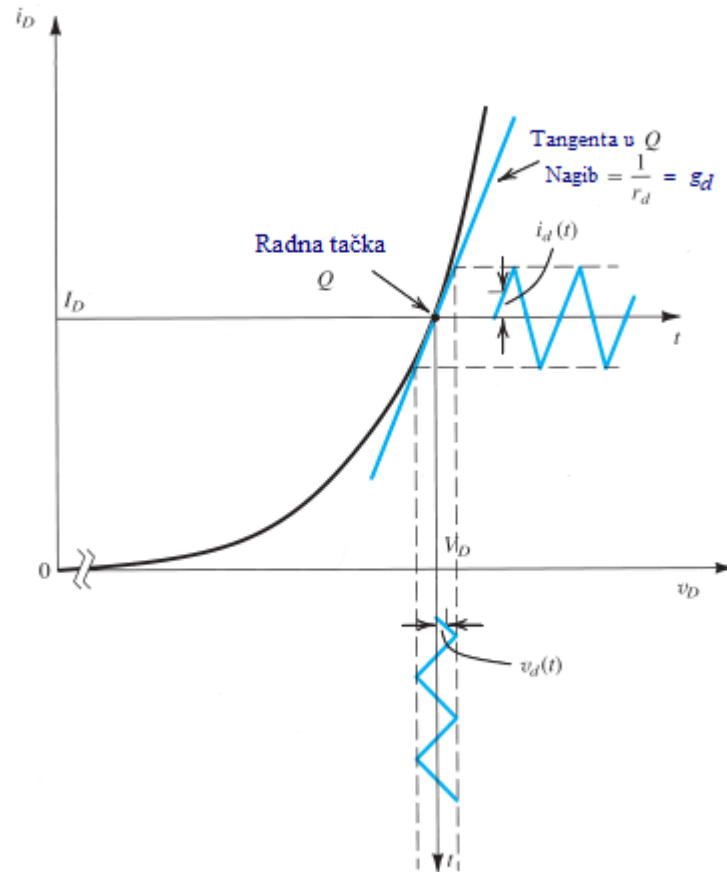
$$i_d(t) = g_d v_d(t)$$

$$r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{V_T}{I_D}$$

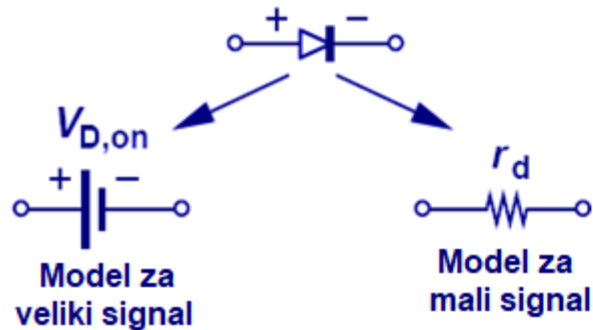
$$V_D(t) = V_D + V_d \cos \omega t$$

$$i_D(t) = I_D + i_d = I_D + g_d v_d = I_D + \frac{1}{r_d} v_d$$

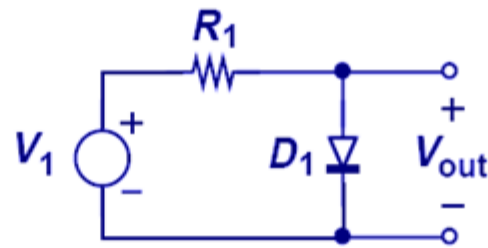
$$I_D(t) = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) + \frac{I_D}{V_T} V_d \cos \omega t = I_D + I_d \cos \omega t$$



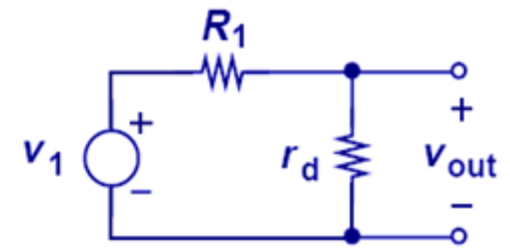
Model diode za male signale



(a)



(b)

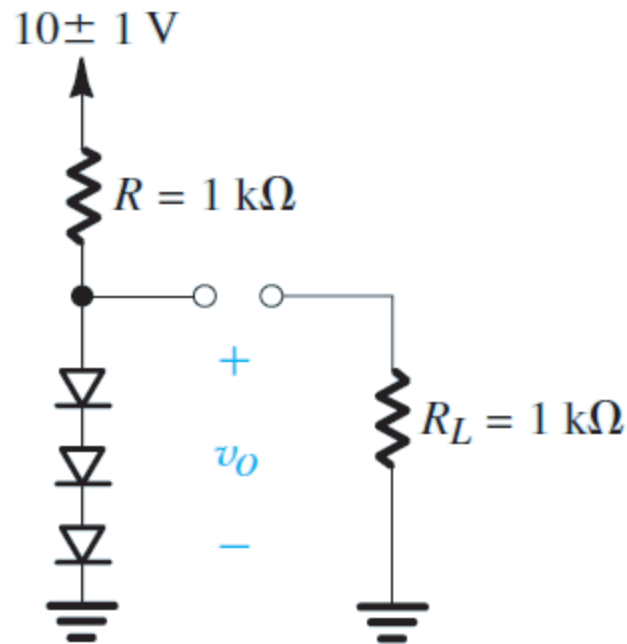


(c)

$$r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{V_T}{I_D}$$

- **Kako postoji linearna zavisnost između malog signala struje i malog signala napona diode, dioda može biti posmatrana kao linearna otpornost (kada su od interesa samo male promjene).**

Prigušivanje promjena na izlazu



$$\Delta V_{out} \approx \frac{3r_d}{R + 3r_d} \Delta V_{IN}$$

$$r_d \approx \frac{V_T}{I_D} \approx \frac{26 \text{ mV}}{7,9 \text{ mA}} \approx 3,3 \Omega$$

$$\Delta V_{out} \approx \frac{3 \cdot 3,3 \Omega}{1000 \Omega + 3 \cdot 3,3 \Omega} 1 \text{ V} = 9,8 \text{ mV}$$

Izračunati približnu promjenu napona na izlazu kada je priključen otpornik R_L .

Vrste dioda

Specijalni tipovi dioda

Zener dioda (probojna dioda)

Radi u režimu proboja.

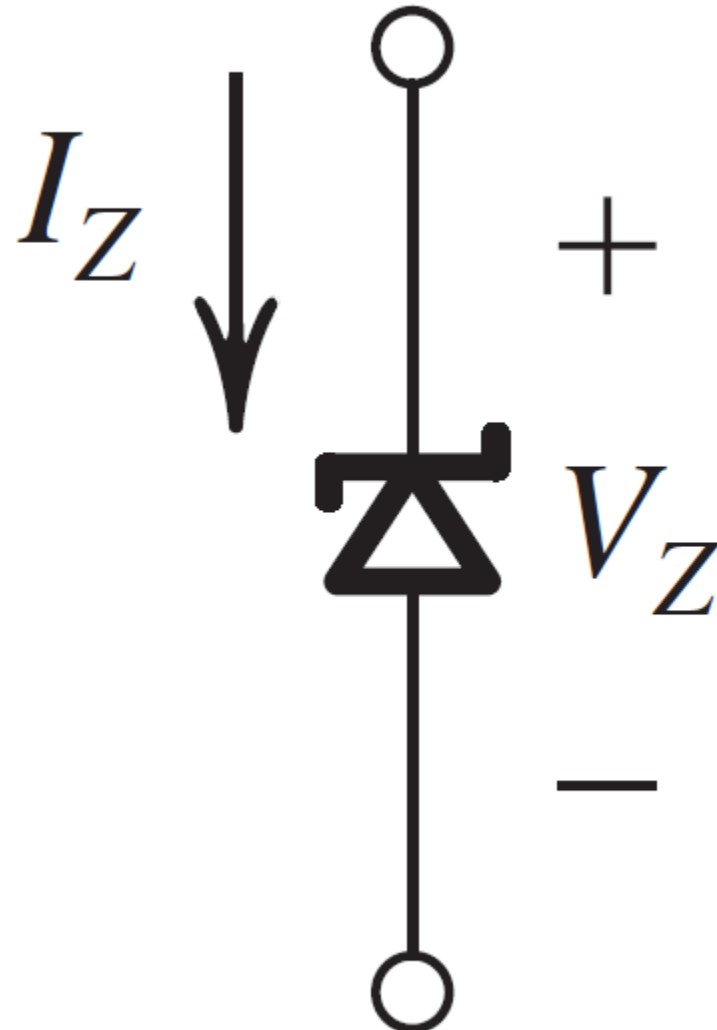
Vrlo velika strmina IV karakteristike u probojnom režimu.

Gotovo konstantan napon na diodi u probojnom režimu.

Može se koristiti u dizajnim naponskih regulatora (o tome više kasnije!)

U normalnim primjenama zener diode, struja utiče u katodu, i katoda je na višem potencijalu od anode.

Stoga I_Z i V_Z , usmjerenja kao na slici, imaju pozitivne vrijednosti.



IV karakteristika zener diode u probojnom režimu

I_{Z0} – struja strujnog koljena, specificirana u datasheet-u Zener diode

I_Z veće od I_{Z0} , po absolutnoj vrijednosti
– IV karakteristika je veoma strma, gotovo verikalna prava linija.

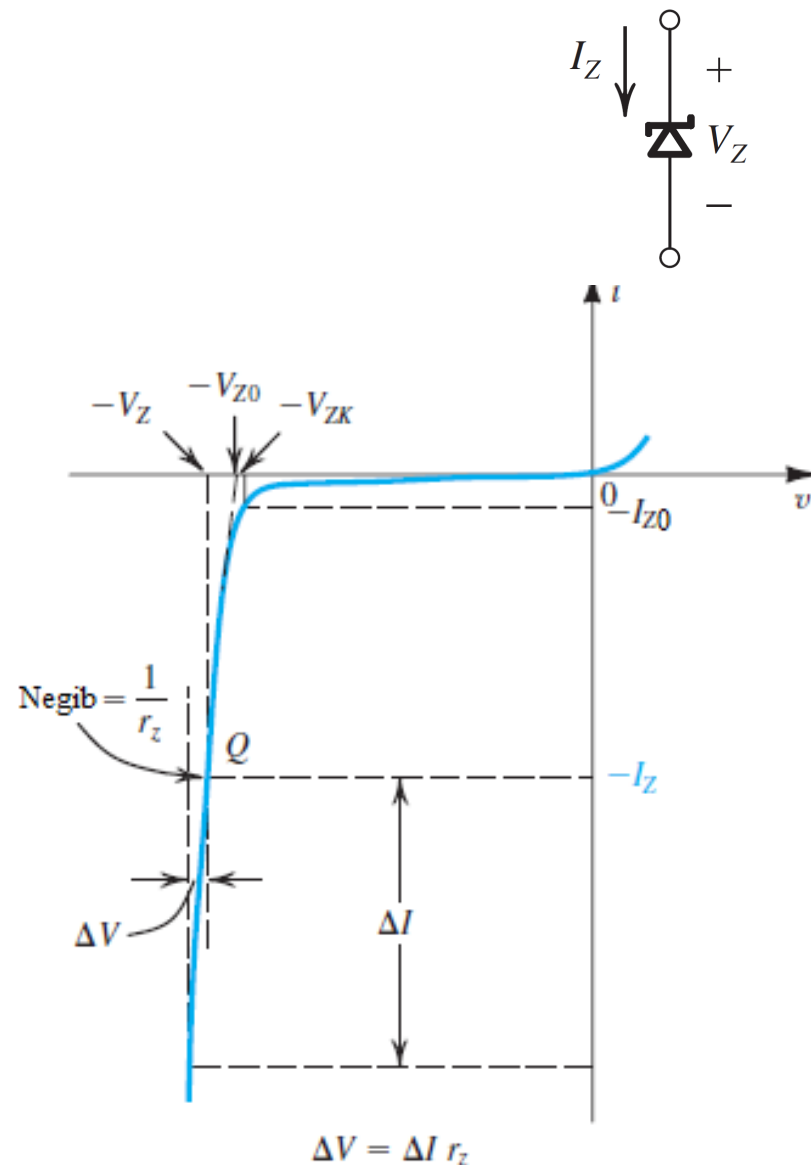
r_z – inkrementalna (dinamička) otpornost Zener diode (od nekoliko Ω do nekoliko desetina Ω)

r_z – raste u blizini strujnog koljena

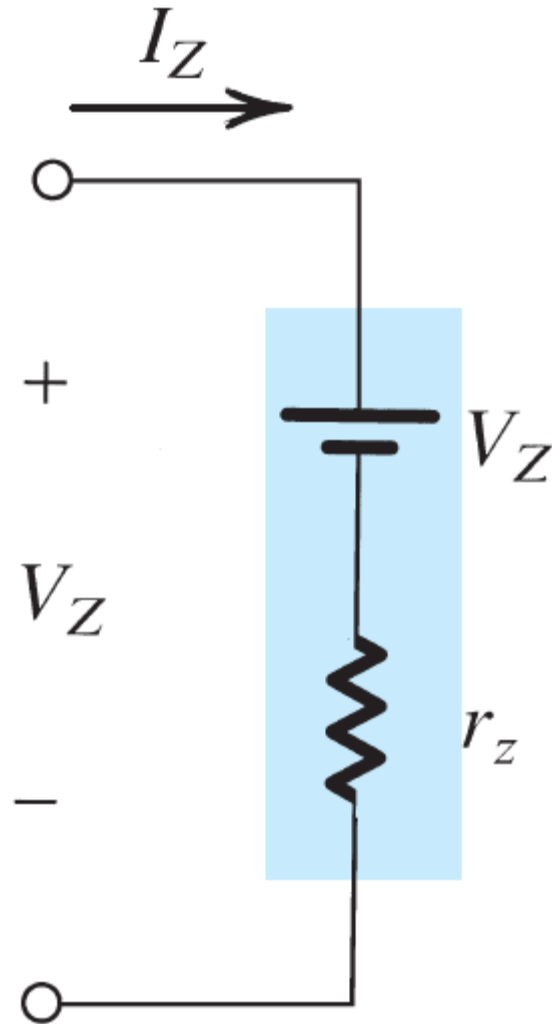
Izbjegavati polarisati Zener diodu u regionu malih struja.

Proizvođač specificira V_Z , r_z , i I_{Z0} .

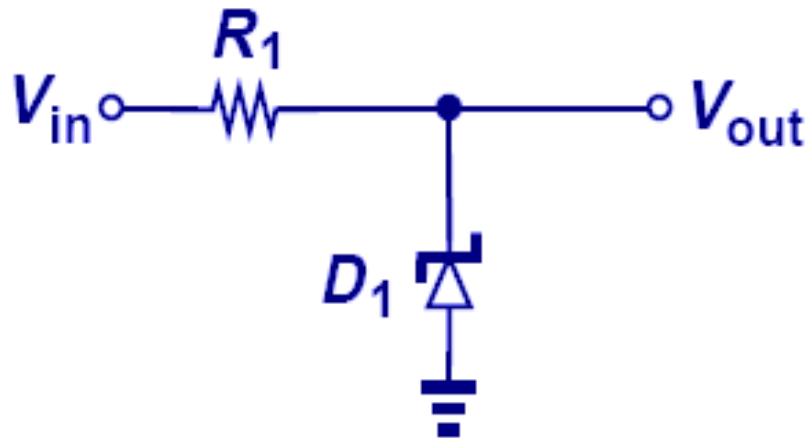
Proizvođač specificira i maksimalnu snagu disipacije. Tako 0.5-W, 6.8V zener dioda može pouzdano provoditi struju do oko 70mA.



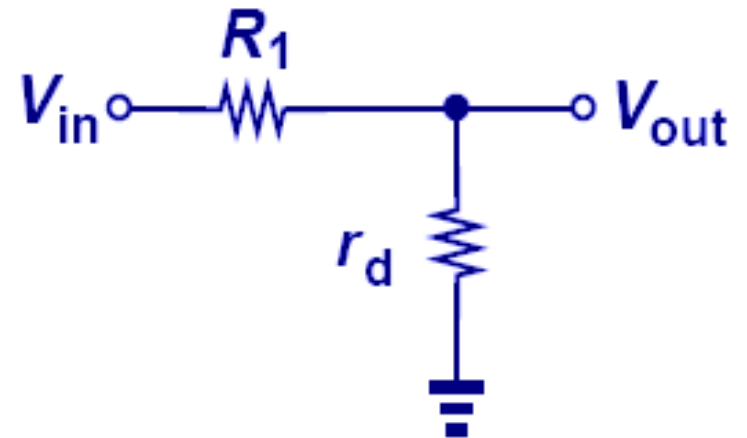
Model Zenner diode



Prosti naponski regulator sa Zener diodom



(a)

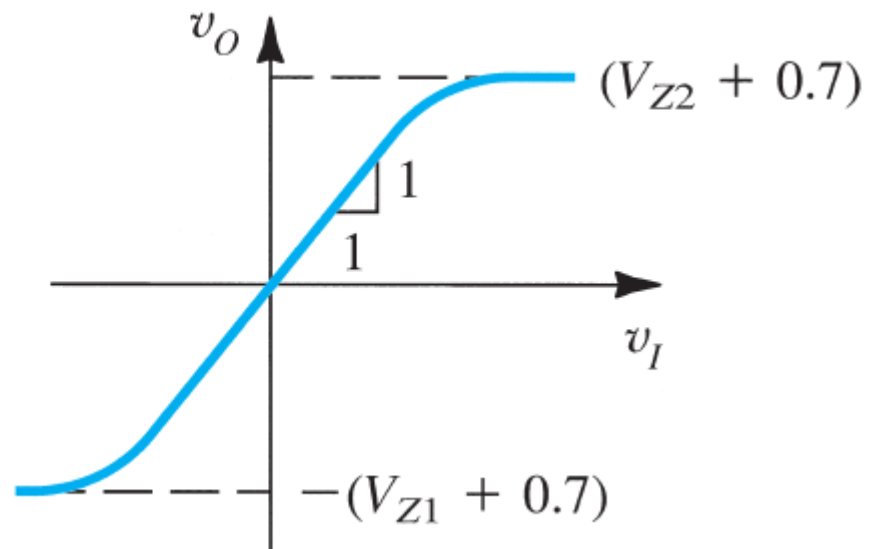
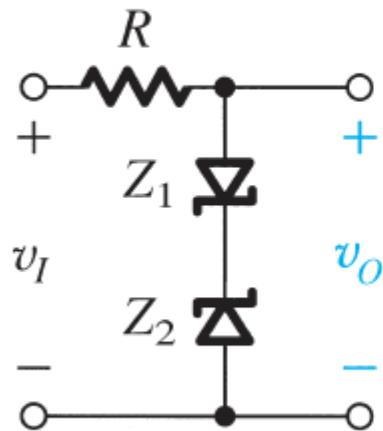


(b)

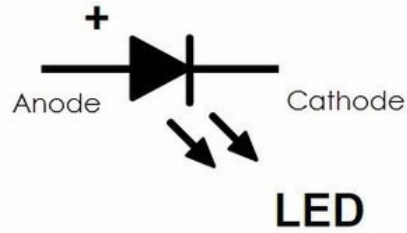
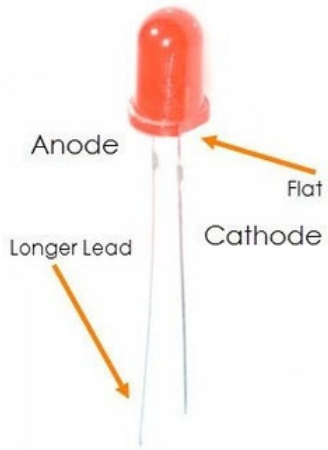
$$\Delta V_{out} = \frac{r_D}{r_D + R_1} \Delta V_{in}$$

- Kako je r_d malo, velike promjene u ulaznom naponu neće se značajno reflektovati na izlazni napon.

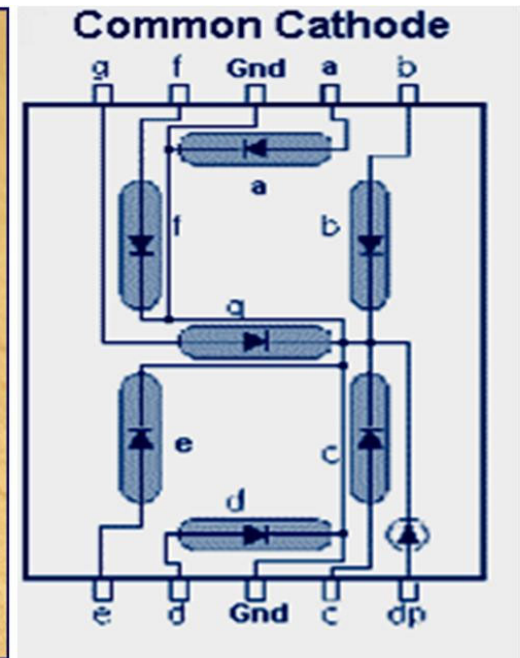
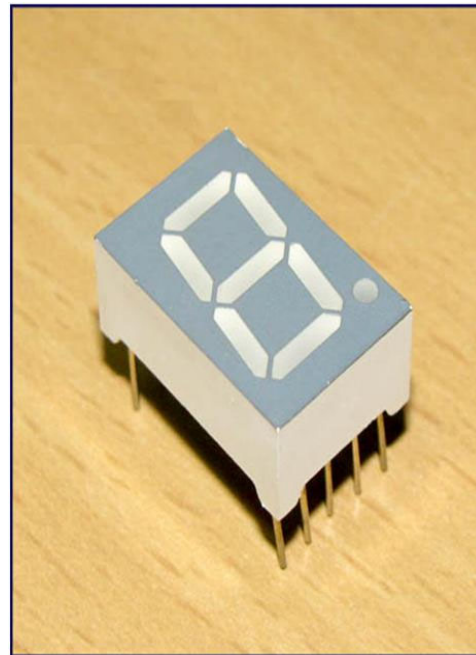
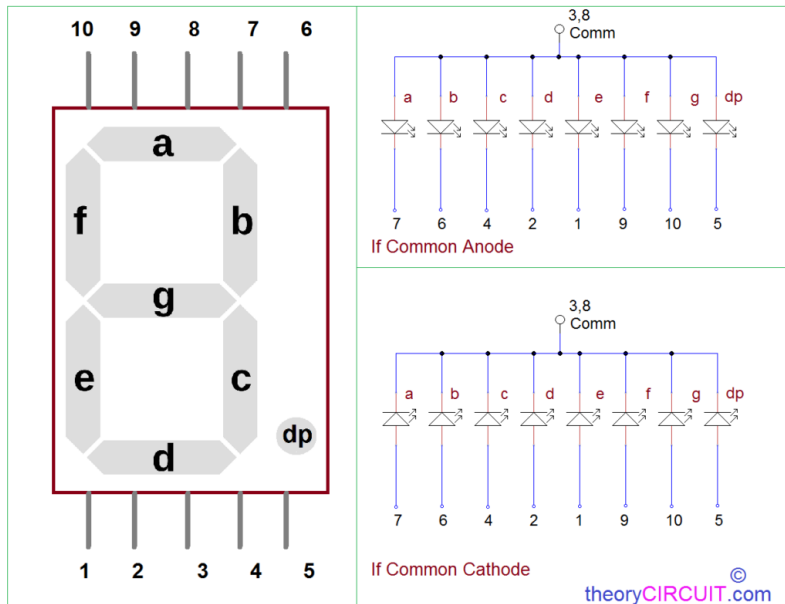
Zener dioda - obostrani limiter



Svjetleća dioda



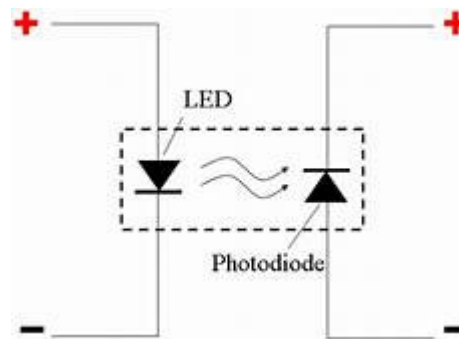
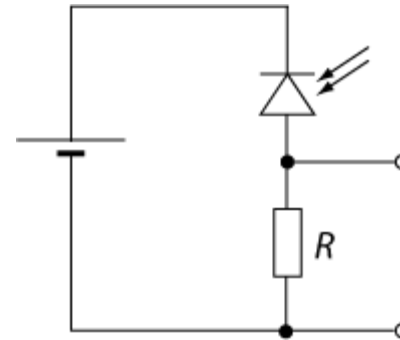
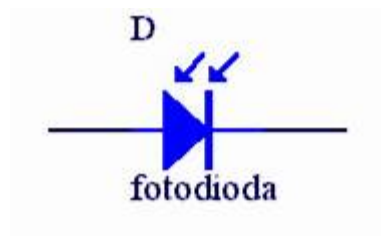
7 Segment Display Pinout



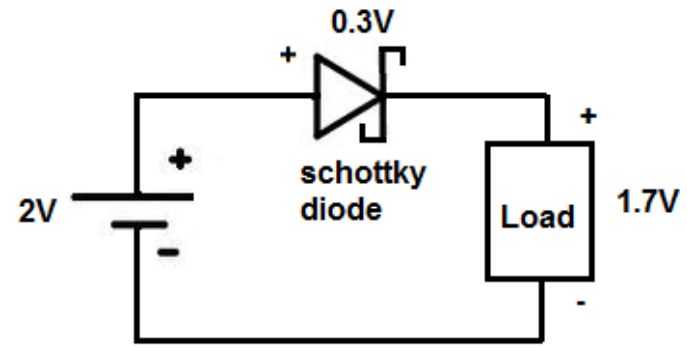
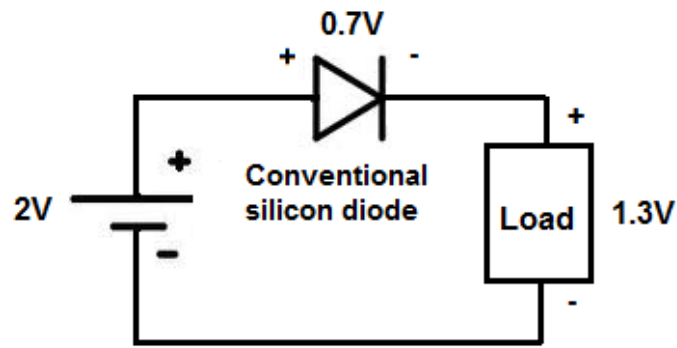
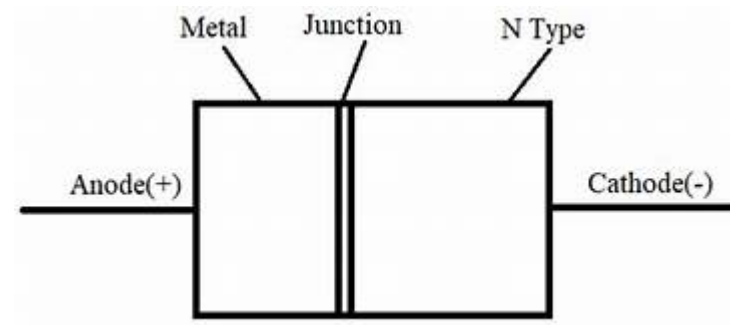
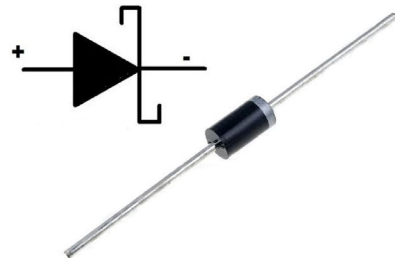
Fotodioda i optoizolatori

Normalan režim rada pri inverznoj polarizaciji.

Pod uticajem svjetlosti provode u inverznom smjeru.



Schottky dioda

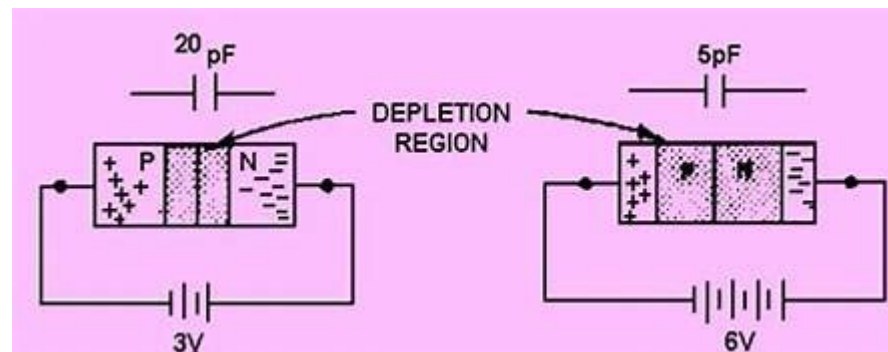


Varikap dioda



Normalan režim rada inverzna polarizacija.

Koriste se kao naponom promjenljiva kapacitivnost.



Automatsko podešavanje radio prijemnika